



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicaciones
(2011-2016)

Trabajo Fin de Grado

“IMPLEMENTACIÓN DEL ENVÍO DE SMS MEDIANTE PLATAFORMA SOFTWARE DEFINED RADIO”

Autor: Sergio Díez Sanz

Tutor: Dr. Víctor P. Gil Jiménez

Leganés, Septiembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a mi familia todo el apoyo recibido durante los años de mi paso por la universidad que han estado siempre dispuestos a prestarme toda la ayuda que he necesitado.

También agradecer a mis amigos que me han hecho pasar muy buenos momentos en todo este tiempo y que me han servido de vía de escape en momentos en los que lo necesitaba.

Por supuesto gracias a mis compañeros de la universidad, de los cuales me llevo grandes amigos, que han hecho que mi paso por ella haya sido muy ameno, y, que cuando lo he necesitado me han prestado su ayuda incondicional. Siempre os recordaré.

A mi tutor, gracias por ofrecerme la oportunidad de realizar este proyecto, del cual he aprendido muchas cosas. Gracias también por resolverme las dudas cuando las he tenido.

Y, por último y no menos importante, gracias a la universidad por proporcionarme los recursos necesarios para la realización del proyecto. En particular agradecerles a los profesores que me han enseñado el trabajo realizado ya que gracias a ellos estoy donde estoy y tengo los conocimientos que tengo.

RESUMEN

El proyecto en cuestión trata la implementación del proceso de intercambio de mensajes en GSM realizado a la hora de enviar un mensaje de texto, comúnmente conocido como SMS. La implementación se ha desarrollado para poder ser lo más semejante posible a la realidad. Para ello el software implementado se ha puesto en práctica con los transceptores NI-USRP 2920 que permiten transmitir y recibir los mensajes mediante radiofrecuencia. El software se ha desarrollado usando el entorno de desarrollo gráfico LabVIEW.

Además, se ha integrado este proceso en el software implementado en proyectos anteriores relacionados con éste, obteniendo al final un programa que no sólo realiza el envío del SMS, si no que realiza todos los procesos previos y posteriores para obtener un funcionamiento de la aplicación más real.

Palabras clave: SMS, GSM, SDR, LabVIEW, USRP, mensaje, trama, ráfaga.

ABSTRACT

The project in question aims to implement the message exchange process in GSM that is performed at the moment of sending a text message, as known as SMS. The implementation has been developed to be similar to the reality. For that, the implemented software has been put into practice with the NI USRP-2920 transceivers, which allow transmitting and receiving messages through radiofrequency. The software has been developed using the graphic development environment LabVIEW.

In addition, this process has been integrated in the implemented software in previous projects related to this one. Finally it's been obtained a program that performs SMS sending, previous processes and later ones.

Keywords: SMS, GSM, SDR, LabVIEW, USRP, message, frame, burst.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
GLOSARIO	7
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 MOTIVACIÓN	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA	11
2. INTRODUCTION	13
2.1 MOTIVATION	13
2.2 OBJECTIVES	13
2.3 DOCUMENT DESCRIPTION	13
3. ANALISIS DEL PROYECTO	15
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.2 ESTADO DEL ARTE	16
3.2.1 Evolución de la telefonía móvil	16
3.2.2 Alternativas SDR	17
3.2.2.1 GNU Radio [4]	17
3.2.2.2 SoapySDR [5]	18
3.2.2.3 Photos SDR [6]	18
3.2.2.4 SDR-Radio.com [7]	18
3.2.2.5 Elección de la solución	19
3.2.3 Soluciones existentes	20
3.2.3.1 GL's MAPS [8]	20
3.2.3.2 Soluciones online	20
3.2.4 Proyectos y publicaciones relacionados	21
3.2.4.1 Design & Simulation of GSM FH Transmitter Using SDR Technology [12]	21
3.2.4.2 Implementación del procedimiento "Location Update" de GSM en plataforma Software Defined Radio [1]	21
3.3 MARCO REGULADOR	21
3.3.1 Marco legal	21
3.3.2 Marco Técnico	21
3.4 ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO	22
3.5 PRESUPUESTO DEL PROYECTO	22
3.5.1 Materiales	22
3.5.2 Recursos humanos	23
3.5.3 Coste total	23
3.6 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	24
4. GSM	26
4.1 HISTORIA	26
4.2 ARQUITECTURA DE RED	26

4.2.1 Estación móvil	27
4.2.1.1 <i>Funciones</i>	27
4.2.2 Subsistema de estación base (BSS)	27
4.2.2.1 <i>Funciones</i>	28
4.2.3 Subsistema de red	28
4.2.3.1 <i>Funciones</i>	29
4.3 SERVICIOS	29
4.3.1 Servicios básicos	29
4.3.1.1 <i>Teleservicios</i>	29
4.3.1.2 <i>Servicios portadores</i>	29
4.3.2 Servicios suplementarios	30
4.4 INTERFAZ RADIO	30
4.4.1 Capa física (L1)	30
4.4.1.1 <i>Módem radio</i>	30
4.4.1.1.1 <i>Modulación</i>	30
4.4.1.1.2 <i>Ráfagas</i>	31
4.4.1.2 <i>Multiplexación y sincronización</i>	32
4.4.1.2.1 <i>Acceso múltiple</i>	32
4.4.1.2.2 <i>Agrupación de tramas</i>	33
4.4.1.3 <i>Codificación</i>	34
4.4.1.3.1 <i>Codificación</i>	34
4.4.1.3.2 <i>Entrelazado</i>	35
4.4.1.4 <i>Canales</i>	35
4.4.1.4.1 <i>Canales de tráfico (TCH)</i>	36
4.4.1.4.2 <i>Canales de señalización (CCH)</i>	36
4.4.1.4.2.1 <i>Canales de difusión</i>	36
4.4.1.4.2.2 <i>Canales comunes (CCCH)</i>	36
4.4.1.4.2.3 <i>Canales dedicados</i>	36
4.4.2 Capa de enlace de datos (L2)	37
4.4.3 Capa de red (L3)	37
4.5 SEGURIDAD	37
5. MATERIAL UTILIZADO	39
5.1 <i>ORDENADOR PORTÁTIL</i>	39
5.2 <i>LABVIEW [30]</i>	40
5.3 <i>NI USRP 2920 [31]</i>	41
6. DESARROLLO DEL SOFTWARE	43
6.1 <i>PLANTEAMIENTO</i>	43
6.2 <i>DISEÑO DE LA SOLUCIÓN</i>	45
6.2.1 Creación de los mensajes	46
6.2.1.1 <i>Mensajes</i>	46
6.2.1.1.1 <i>Mensajes estación móvil</i>	46
6.2.1.1.1.1 <i>SABM (CM-SERV-REQ)</i>	46
6.2.1.1.1.2 <i>SABM (SAPI=3)</i>	50
6.2.1.1.1.3 <i>DISC (SAPI=0)</i>	50
6.2.1.1.1.4 <i>CP-DATA</i>	51
6.2.1.1.1.5 <i>CP-ACK</i>	59
6.2.1.1.2 <i>Mensajes estación base</i>	59
6.2.1.1.2.1 <i>UA</i>	59

6.2.1.1.2.2 CP-DATA.....	61
6.2.1.1.2.3 CP-ACK.....	63
6.2.1.2 Construcción de los mensajes.....	63
6.2.1.2.1 Estación móvil.....	63
6.2.1.2.1.1 DLL.....	63
6.2.1.2.1.2 MM-Sublayer.....	64
6.2.1.2.1.3 SM-AL.....	65
6.2.1.2.1.4 SM-TL.....	67
6.2.1.2.1.5 SM-RL.....	67
6.2.1.2.1.6 CM-Sublayer.....	68
6.2.1.2.2 Estación base.....	70
6.2.1.2.2.1 DLL.....	70
6.2.1.2.2.2 SM-TL.....	70
6.2.1.2.2.3 SM-RL.....	71
6.2.1.2.2.4 CM-Sublayer.....	72
6.2.2 Codificación del canal.....	73
6.2.3 Codificación de las ráfagas.....	74
6.2.4 Modulación.....	75
6.2.5 Construcción de las tramas.....	76
6.2.6 Transmisión de tramas.....	77
6.2.6.1 Obtención de forma de onda.....	78
6.2.6.2 Transmisión de la forma de onda.....	80
6.2.7 Demodulación.....	81
6.2.8 Recepción de tramas.....	83
6.2.9 Decodificación del canal.....	83
6.2.10 Integración.....	84
6.2.10.1 MS.....	85
6.2.10.2 BTS.....	87
6.3 INTERFAZ DE USUARIO.....	89
6.3.1 MS.....	89
6.3.2 BTS.....	90
7. PRUEBAS FINALES.....	91
8. CONCLUSIONES.....	98
9. CONCLUSIONS.....	99
ANEXOS.....	100
A. SUMMARY.....	100
A.1. Introduction.....	100
A.2. Project Analysis.....	100
A.3. GSM.....	101
A.4. Resources used.....	102
A.5. Software development.....	102
A.6. Final tests.....	104
A.7. Conclusions.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: EVOLUCIÓN DE LA TELEFONÍA MÓVIL	16
FIGURA 2: GNURADIO [4].....	17
FIGURA 3: PHOTOS SDR [6].....	18
FIGURA 4: SDR-RADIO.COM [7]	19
FIGURA 5: DIAGRAMA DE GANTT DEL PROYECTO.....	25
FIGURA 6: ARQUITECTURA GSM [16].....	26
FIGURA 7: SUBSISTEMA DE ESTACIÓN BASE [17]	28
FIGURA 8: ESQUEMA GMSK [20]	31
FIGURA 9: NORMAL BURST [21].....	31
FIGURA 10: FREQUENCY BURST [21]	32
FIGURA 11: SYNCHRONIZATION BURST [21].....	32
FIGURA 12: DUMMY BURST [21]	32
FIGURA 13: ACCES BURST [21]	32
FIGURA 14: FDMA/TDMA [21]	33
FIGURA 15: DESPLAZAMIENTO TIMESLOTS GSM [16].....	33
FIGURA 16: AGRUPACIÓN DE TRAMAS GSM [16].....	34
FIGURA 17: CODIFICACIÓN EN GSM [21]	35
FIGURA 18: SEGURIDAD EN GSM.....	38
FIGURA 19: MACBOOK PRO RETINA 13" [29]	39
FIGURA 20: PANEL FRONTAL LABVIEW	40
FIGURA 21: DIAGRAMA DE BLOQUES LABVIEW	41
FIGURA 22: NI-USRP 2920 [31].....	41
FIGURA 23: PANEL DE CONEXIONES USRP [32].....	42
FIGURA 24: PROCESO DE INTERCAMBIO DE MENSAJES [36]	44
FIGURA 25: FORMATO SABM (CM-SERV-REQ) [26].....	46
FIGURA 26: FORMATO ADDRESS FIELD [21]	47
FIGURA 27: FORMATO "LENGTH INDICATOR FIELD" [26].....	47
FIGURA 28: FORMATO "MOBILE STATION CLASSMARK" [28].....	49
FIGURA 29: FORMATO "MOBILE IDENTITY" [28]	49
FIGURA 30: FORMATO SABM (SAPI=3) [26]	50
FIGURA 31: FORMATO DISC (SAPI=0) [26].....	51
FIGURA 32: FORMATO CP-DATA [36]	51
FIGURA 33: FORMATO "TRANSACTION IDENTIFIER" [36].....	52
FIGURA 34: FORMATO "CP-USER DATA" [36].....	52
FIGURA 35: FORMATO RP-DATA [36]	53
FIGURA 36: FORMATO "DESTINATION ADDRESS" [36]	54
FIGURA 37: FORMATO "RP-USER DATA" [36].....	55
FIGURA 38: FORMATO "SMS-SUBMIT" [34].....	56
FIGURA 39: FORMATO "TP-DA" [34].....	58
FIGURA 40: FORMATO "TYPE-OF-ADDRESS" [34]	58
FIGURA 41: FORMATO "ADDRESS VALUE" [34]	58
FIGURA 42: CODIFICACIÓN CARACTERES [33].....	59
FIGURA 43: FORMATO UA [26]	60
FIGURA 44: FORMATO UA (CM-SERV-REQ) [26]	61
FIGURA 45: FORMATO SMS-SUBMIT-REPORT [34].....	62

FIGURA 46: FORMATO "TP-SCTS" [34].....	62
FIGURA 47: DIAGRAMA DE BLOQUES "DLL.VI" (SABM) (MS)	63
FIGURA 48: DIAGRAMA DE BLOQUES "DLL.VI" (DISC) (MS).....	64
FIGURA 49: DIAGRAMA DE BLOQUES "MM-SUBLAYER.VI" (MS).....	65
FIGURA 50: DIAGRAMA DE BLOQUES "SM-AL.VI" (MS)	66
FIGURA 51: DIAGRAMA DE BLOQUES "SM-TL.VI" (MS)	67
FIGURA 52: DIAGRAMA DE BLOQUES "SM-RL.VI" (MS)	68
FIGURA 53: DIAGRAMA DE BLOQUES "CM-SUBLAYER.VI" (CP-DATA) (MS)	69
FIGURA 54: DIAGRAMA DE BLOQUES "CM-SUBLAYER.VI" (CP-ACK) (MS).....	69
FIGURA 55: DIAGRAMA DE BLOQUES "DLL.VI" (BS).....	70
FIGURA 56: DIAGRAMA DE BLOQUES "SM-TL.VI" (BS).....	71
FIGURA 57: DIAGRAMA DE BLOQUES "SM-RL.VI" (BS)	72
FIGURA 58: DIAGRAMA DE BLOQUES "SELECCIONAR MENSAJE.VI"	73
FIGURA 59: DIAGRAMA DE BLOQUES "SDCCH.VI"	74
FIGURA 60: DIAGRAMA DE BLOQUES "BURSTS.VI"	74
FIGURA 61: DIAGRAMA DE BLOQUES "MODULADOR.VI"	75
FIGURA 62: DIAGRAMA DE BLOQUES "CREATE SLOTS.VI"	76
FIGURA 63: DIAGRAMA DE BLOQUES "SLOTS.VI".....	77
FIGURA 64: DIAGRAMA DE BLOQUES "ELEGIR MENSAJE MODULADO.VI"	78
FIGURA 65: DIAGRAMA DE BLOQUES "GET WAVEFORMS.VI"	79
FIGURA 66: DIAGRAMA DE BLOQUES TRANSMISIÓN (ENVÍO)	80
FIGURA 67: DIAGRAMA DE BLOQUES TRANSMISIÓN (ESPERA)	81
FIGURA 68: DIAGRAMA DE BLOQUES "RECEPTOR PATRON.VI".....	82
FIGURA 69: DIAGRAMA DE BLOQUES RECEPCIÓN	83
FIGURA 70: DIAGRAMA DE BLOQUES "DECODIFICADOR SDCCH.VI"	84
FIGURA 71: FUNCIONAMIENTO "MS.VI"	86
FIGURA 72: FUNCIONAMIENTO "BTS.VI"	88
FIGURA 73: PANEL FRONTAL "MS.VI"	89
FIGURA 74: PANEL FRONTAL "BTS.VI"	90
FIGURA 75: SISTEMA FINAL COMPLETO	91
FIGURA 76: "MS.VI" INICIO.....	92
FIGURA 77: "BTS.VI" INICIO.....	92
FIGURA 78: "BTS.VI" ANTES DE CP-DATA	93
FIGURA 79: "BTS.VI" RECIBIDO PRIMER CP-DATA	94
FIGURA 80: "BTS.VI" RECIBIDO CP-DATA FINAL.....	94
FIGURA 81: "MS.VI" ANTES CP-DATA	95
FIGURA 82: "MS.VI" RECIBIDO CP-DATA	96
FIGURA 83: "MS.VI" FINAL	96
FIGURA 84: "BTS.VI" FINAL	97
FIGURA 85: FINAL SYSTEM	104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: COMPARATIVA SOLUCIONES	20
TABLA 2: COSTES MATERIALES	23
TABLA 3: COSTES HUMANOS.....	23
TABLA 4: COSTE TOTAL	24
TABLA 5: CAMPOS ADDRESS FIELD	47
TABLA 6: CAMPOS "LENGTH INDICATOR FIELD"	48
TABLA 7: CAMPOS CM-SERV-REQ	48
TABLA 8: VALORES "MOBILE STATION CLASSMARK"	49
TABLA 9: CAMPOS CP-DATA	52
TABLA 10: CAMPOS "CP-USER DATA"	53
TABLA 11: CAMPOS RP-DATA	54
TABLA 12: CAMPOS "DESTINATION ADDRESS"	54
TABLA 13: CAMPOS "RP-USER DATA".....	55
TABLA 14: CAMPOS SMS-SUBMIT	57
TABLA 15: CAMPOS SMS-SUBMIT-REPORT	62

GLOSARIO

AB: Access Burst

ACK: Acknowledge

AGCH: Access Grant Channel

API: Application Programming Interface

AuC: Authentication Center

BCC: Base station Color Code

BCH: Broadcast Channel

BS: Base Station

BSC: Base Station Controller

BSS: Base Station Subsystem

BTS: Base Transceiver Station

CC: Call Control

CCCH: Common Control Channel

CCOO: Comisiones Obreras

CEPT: Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications

CM: Connection Management

CP: Connection Protocol

DA: Destination Address

DB: Dummy Burst

DCS: Data Coding Scheme

DISC: Disconnect

DLL: Data Link Layer

ECC: Error Correction Code

EIR: Equipment Identity Register

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FACCH: Fast Associated Control Channel

FAX: Facsímil

FB: Frequency Burst

FCH: Frequency Channel

FDMA: Frequency Division Multiplexing Access

FEC: Forward Error Correction

GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying

GSM: Global System for Mobile communications

HLR: Home Location Register

HSPA: High-Speed Packet Access

IEI: Information Element Identifier

IMEI: International Mobile Station Equipment Identity

IMSI: International Mobile Subscriber Identity

IP: Internet Protocol

LAPD: Link Access Protocol D-Channel

LTE: Long Term Evolution

ME: Mobile Equipment

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output

MM: Mobility Management

MR: Message Reference

MS: Mobile Station

MSC: Mobile Switching Centre

MSISDN: Mobile Station International Subscriber Directory Number

MTI: Message Type Indicator

NB: Normal Burst

NI: Native Instruments

NMC: Network Management Centre

PC: Personal Computer

PCH: Paging Channel

PI: Parameter Indication

PID: Protocol Identificator

PSTN: Public Switched Telephone Network

RACH: Random Access Channel

RAND: Random Number

RD: Reject Duplicates

RDSI: Red Digital de Servicios Integrados

RP: Reply Path

RPDU: Relay Protocol Data Unit

RPE-LTP: Regular Pulse Excitation - Long Term Prediction

RR: Radio Resources

RTPC: Red Telefónica Pública Conmutada

RX: Recepción

SABM: Set Asynchronous Balanced Mode

SACCH: Slow Associated Control Channel

SAPI: Service Access Point Identifier

SB: Synchronization Burst

SCH: Synchronization Channel

SCTS: Service Centre Timestamp

SDCCH: Standalone Control Channel

SDK: Software Development Kit

SDR: Software Defined Radio

SIM: Subscriber Identity Module

SM-AL: Short Message Application Layer

SM-RL: Short Message Relay Layer

SMS: Short Message Service

SM-TL: Short Message Transfer Layer

SRES: Signed Response

SRR: Status Report Request

TCH: Traffic Channel

TDMA: Time Division Multiplexing Access

TFG: Trabajo Fin de Grado

TMSI: Temporal Mobile Subscriber Identity

TP: Transfer Protocol

TPDU: Transfer Protocol Data Unit

TX: Transmission

UA: Unnumbered Acknowledge

UD: User Data

UDHI: User Data Header Indication

UDL: User Data Length

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

USRP: Universal Software Radio Peripheral

VLR: Visitor Location Register

VP: Validity Period

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El uso de la tecnología GSM original implica la utilización de diversos aparatos específicos de hardware, cada uno de los cuales realiza una función dentro de la red ya mencionada. Esto supone una gran inversión tanto en la adquisición como en el mantenimiento de dichos aparatos.

Gracias al progreso de la tecnología, en particular del avance del desarrollo de software, surgió la idea del SDR (Software Defined Radio). Esta idea sugiere la implementación de los diversos dispositivos de hardware usados en el sistema GSM en software para su puesta en funcionamiento por un procesador genérico.

La Universidad Carlos III ha puesto en práctica la idea del SDR con el objetivo de usar las facilidades que proporcionan los programas de software para la docencia, para mostrar así una visión más práctica y visual del funcionamiento del sistema GSM. Este TFG en concreto es la continuación del TFG de Fernando Rabadán, que implementaba el proceso de “Location Update” en GSM [1].

Mediante la unión y la integración de los TFGs ya citados, este, y los demás futuros proyectos enfocados al ámbito del presente, se puede llegar a implementar mediante software el sistema GSM casi por completo, lo cual demostraría el gran futuro que tiene por delante SDR.

1.2 Objetivos

El principal objetivo del proyecto es la implementación del servicio de intercambio de mensajes cortos en GSM, comúnmente conocido como SMS (Short Message Service). Esto implica por una parte la creación, codificación, modulación y transmisión de cada mensaje implicado en el proceso, y, por otra parte, la recepción, la demodulación, la decodificación y la interpretación de dichos mensajes.

Como objetivo secundario, se trata también de integrar el servicio SMS en el software desarrollado en los TFGs mencionados antes, consiguiendo así un funcionamiento más completo y semejante a la realidad.

En todo el proceso de desarrollo se ha tenido en cuenta la finalidad de mostrar el funcionamiento para la docencia, ya sea mediante su utilización en prácticas de laboratorio o mediante la aplicación en las clases a modo de demostración.

1.3 Descripción de la memoria

La estructura que seguirá el presente documento es la siguiente:

- **Introducción:** Explica los motivos de realización y los objetivos del trabajo. También incluye una explicación de la estructura del documento.
- **Análisis del proyecto:** Analiza todos los aspectos que influyen en el proyecto, como son: el estado del arte, los marcos regulador, legal y técnico, el entorno socioeconómico en el que se encuentra y, el presupuesto.
- **GSM:** Se realiza en este capítulo una descripción del estándar seguido para el desarrollo del trabajo para poder comprender mejor el resto de la memoria.

- Material Utilizado: Una descripción del hardware y el software utilizado para el desarrollo.
- Desarrollo de software: En este capítulo se detalla el proceso de desarrollo seguido para la implementación del software final, así como el propio software implementado.
- Pruebas finales: Se detallan los tests hechos al sistema para demostrar el funcionamiento del mismo.
- Conclusiones: Repaso general de lo que supone el proyecto, de las conclusiones extraídas de su realización y del futuro del mismo.

2. INTRODUCTION

2.1 Motivation

GSM use originally implies the utilization of some specific hardware devices, each one of them makes a function inside mentioned network. This means a great investment in acquisition and maintenance.

Due to the technology progress, specifically in the software development area, the idea of SDR (Software Defined Radio) was developed. This idea suggests the software implementation of the hardware devices used in GSM system. This software can work with a generic processor.

The UC3M has put into practice the SDR idea aiming to use the facilities that software can provide to teaching. This could show a more practice and more visual view of the GSM features. Specifically this project continues the Fernando Rabadán project, which was implementing the “Location Update” process in GSM [1].

Joining and integrating this types of projects it's possible to implement full GSM system in software, which demonstrates the SDR potential.

2.2 Objectives

The main goal of the project is to implement the Short Message Service (SMS) in GSM. On one hand, this implies the creation, coding, modulation and transmission of each message involved in the process. On the other hand, each message has to be received, demodulated, decoded and interpreted.

As a secondary target, the project aims to integrate the SMS service in the software developed in previous SDR projects, simulating more complete and realistic GSM performance.

It has been taken into account the finality of showing the performance for teaching. This software can be used for laboratory practices and for showing in class.

2.3 Document description

Document structure is as follows:

- Introduction: This chapter explains the reasons of realization of the project and its main objectives. It's also included the document structure explanation.
- Project analysis: This section analyzes all aspects that influence the project like: the state of the art, the legal framework, the technical framework, the socioeconomic environment and the budget.
- GSM: It describes the GSM standard to facilitate understanding the rest of the document.
- Resources used: It describes hardware and software used to develop the project.

- Software development: This chapter details the development process followed to implement the final software.
- Final tests: It describes the tests made to demonstrate the system work.
- Conclusions: In the last section there is a project overview, the conclusions drawn and the project future.

3. ANALISIS DEL PROYECTO

3.1 Planteamiento del problema

En gran parte de la historia del ser humano se han usado distintos medios para el desarrollo de las telecomunicaciones. En sus orígenes se usaban señales de todo tipo para poder realizar comunicaciones a distancia, ya fueran visuales o acústicas, se ha tratado de posibilitar las interacciones a distancia para su uso en distintas situaciones como pueden ser los conflictos bélicos o el día a día de la vida cotidiana. Con el avance de las tecnologías se ha convertido en un aspecto fundamental del progreso la mejora y el desarrollo del campo de las telecomunicaciones, llegando a la situación actual en la que casi cualquier persona utiliza a diario medios de comunicación.

Esta necesidad creciente de comunicarnos impulsó la aparición de los primeros servicios de telefonía móvil en la década de los 50. A partir de entonces distintas compañías especializadas en el sector empezaron a instalar sus redes móviles en distintos países del mundo con el fin de prestar dicho servicio. Con los objetivos de solucionar los inconvenientes de las redes analógicas gracias a la aparición de la telefonía móvil digital, y de unificar los sistemas de comunicaciones móviles para posibilitar la interoperabilidad de las redes, surgió en los años 90 el estándar GSM.

Con el avance de las tecnologías, posterior a la aparición de GSM, y con el fin de mejorar las prestaciones y servicios ofrecidos, han ido apareciendo nuevos estándares de telefonía móvil, UMTS, HSPA y el que se usa en la actualidad, LTE.

Paralelo a este desarrollo, se produjo también un gran avance en el campo de la computación y del desarrollo de software, lo que permitió sustituir muchas de las tareas realizadas mediante hardware por componentes de software de un carácter más genérico y válidos para una gran diversidad de plataformas. Como consecuencia, en lo relativo a los sistemas de comunicaciones mediante radiofrecuencia, surgieron los sistemas SDR. Estos sistemas permiten que un mismo hardware pueda realizar distintas funciones mediante un cambio en su configuración introducido por medio de un software específico.

En la actualidad las plataformas SDR no se utilizan en las redes comerciales de comunicaciones debido a su menor rendimiento y eficiencia, lo cual es un aspecto clave en los servicios orientados a usuario. Sin embargo, debido a su gran flexibilidad, estos sistemas permiten implementar una gran variedad de medios de comunicación sin necesidad de la gran inversión que supone la adquisición y mantenimiento de hardware específico. Por ello para la realización de este proyecto se usará SDR como medio de desarrollo del sistema.

La empresa National Instruments, es una compañía líder en sistemas de medida y automatización mediante PC. Dispone de una amplia gama de productos que se pueden usar desde cualquier ordenador genérico para la realización de procesos de adquisición, transmisión, análisis y visualización de datos. Por ello la UC3M dispone en sus laboratorios de comunicaciones de herramientas de dicha empresa, las cuales serán usadas para la realización del trabajo. En concreto se utilizará el software LabVIEW para el desarrollo del programa, y como hardware, se empleará el transceptor USRP-2920 para la realización de las comunicaciones. Más adelante se describirán en profundidad ambas herramientas.

3.2 Estado del arte

3.2.1 Evolución de la telefonía móvil

En la actualidad, la penetración de la telefonía móvil en el mundo llega al punto de que salvo en países y zonas subdesarrolladas, raro es encontrar una persona sin un teléfono móvil, de hecho muchas personas tienen varios para dedicar cada uno a un ámbito de su vida. Esto ha obligado al impulso prematuro de los servicios relacionados, por un lado para mejorar las prestaciones de los servicios y su eficiencia, y, por otro lado, para poder dar servicio al gran número de usuarios que usan los servicios que ofrece la telefonía móvil.

Vivimos en un mundo conectado, principalmente por medio de Internet. Hasta hace pocos años sólo podía accederse a través de un PC, pero con el progreso en el campo de los dispositivos de telefonía móvil, se propició la aparición de los smartphones, lo cual desembocó en un crecimiento aún mayor en cuanto a la penetración de la telefonía móvil en el mundo. Hoy en día, hay más de 7000 millones de líneas, lo que significa que prácticamente hay una línea por habitante del planeta.

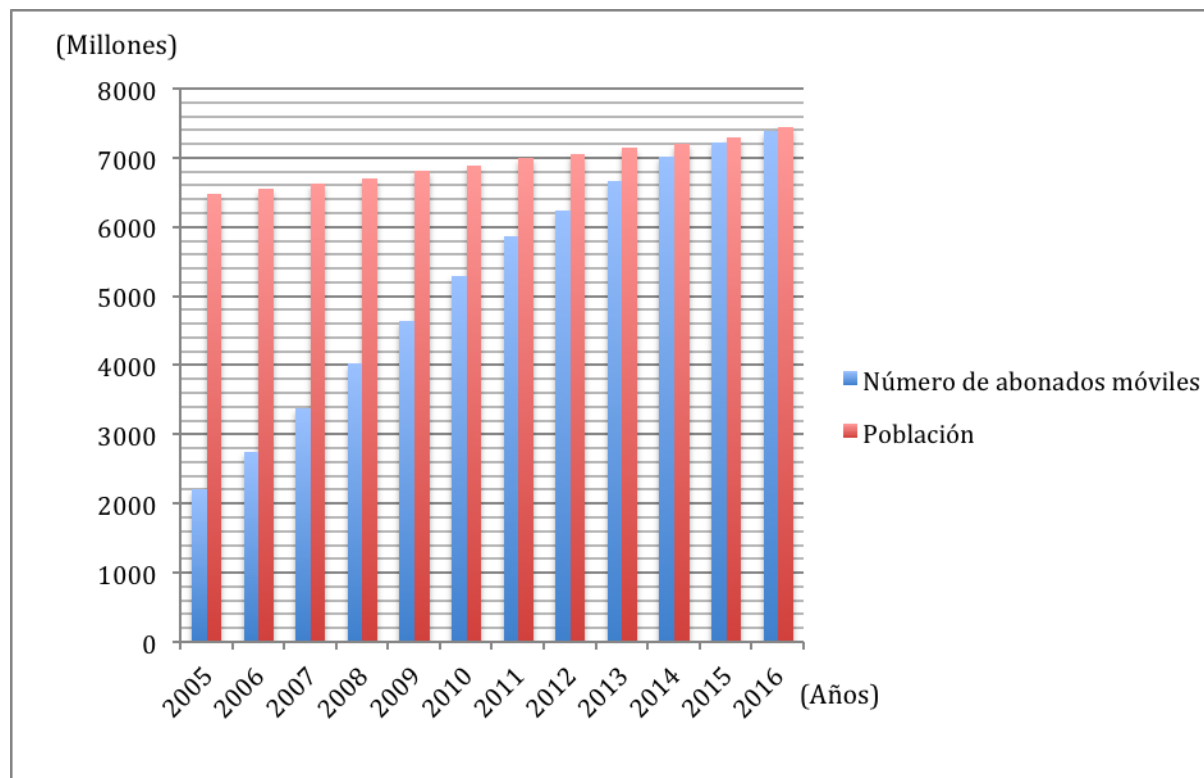


Figura 1: Evolución de la telefonía móvil

Los datos de abonados móviles han sido obtenidos de la página oficial de la ITU y, los datos de población se han obtenido de la página del PRB (Population Reference Bureau) [3].

En la gráfica anterior podemos observar como desde hace 10 años hasta la actualidad la diferencia entre población y abonados móviles ha ido disminuyendo hasta el punto de prácticamente igualarse. En 2005 el porcentaje de abonados en base a la población total era de más de un 34%, con la

consolidación de los smartphones en el mercado hacia el 2007 este porcentaje continuo ascendiendo hasta aproximadamente la mitad de la población, llegando hoy en día a más del 99%.

3.2.2 Alternativas SDR

A continuación se estudiarán las plataformas SDR que podrían usarse en lugar de las proporcionadas por National Instruments. Más adelante se realizará una comparación de soluciones cuya funcionalidad se asemeja a la del proyecto o que al menos realizan una parte de la funcionalidad completa del sistema.

3.2.2.1 GNU Radio [4]

GNU Radio es un SDK (Software Development Kit) que provee herramientas de software para el procesamiento de señales orientado a la implementación de radios. Se puede usar con hardware de radiofrecuencia externo para la creación de sistemas SDR o sin necesidad de estos dispositivos para entornos de simulación.

Es compatible con los USRP y con otros transceptores de carácter más económico, por lo tanto es una solución válida para el desarrollo del proyecto.

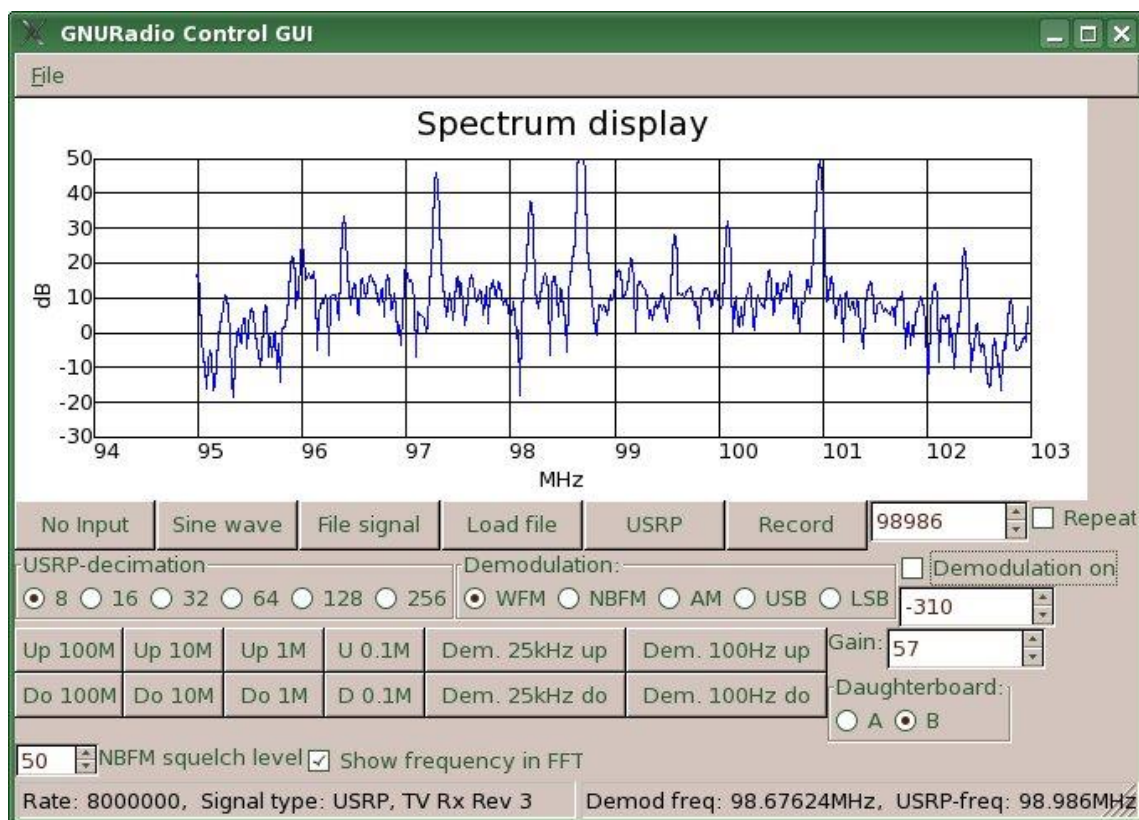


Figura 2: GNURadio [4]

3.2.2.2 SoapySDR [5]

SoapySDR es una librería de código abierto para C y C++ para permitir la interacción con dispositivos SDR. Es compatible con una gran variedad de hardware SDR debido al carácter neutral de sus conectores para los dispositivos.

Podría ser usado para crear una plataforma SDR, ya que gracias a su carácter neutral y generalizado es compatible con una gran variedad de hardware radio.

3.2.2.3 Photos SDR [6]

Photos SDR es un entorno de desarrollo open source para el desarrollo de aplicaciones en ecosistemas SDR. El SDK de Photos contiene herramientas de diseño gráfico, bloques de procesamiento de señales GNU Radio y drivers para el soporte de distintos dispositivos de radiofrecuencia.

Esta iniciativa se encuentra dentro del proyecto Photos, el cual trata de implementar un framework para el diseño de topologías con bloques de procesamiento interconectados entre sí.

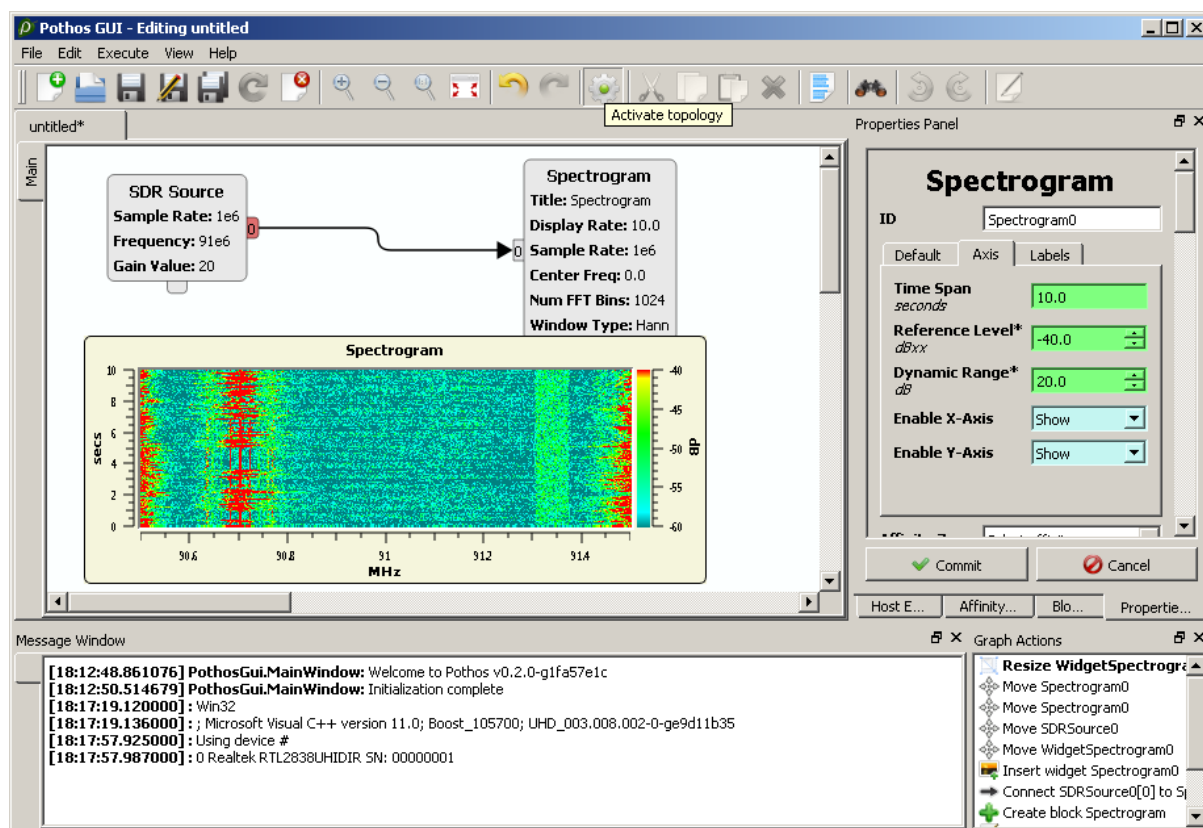
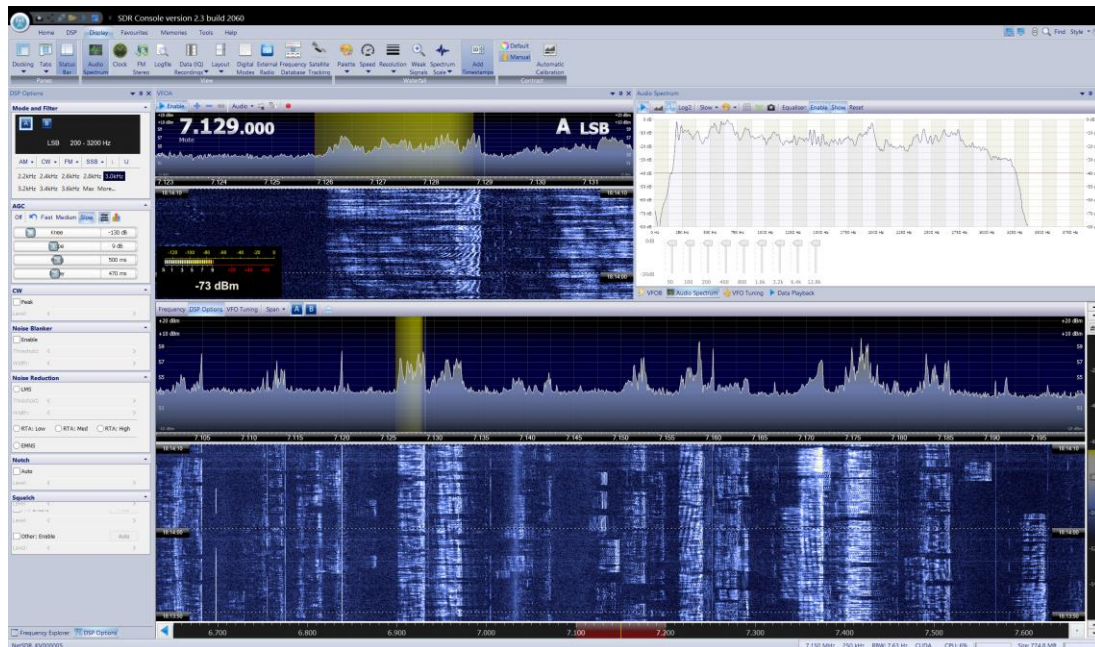


Figura 3: Photos SDR [6]

3.2.2.4 SDR-Radio.com [7]

SDR-Radio.com es una herramienta gráfica gratuita para su uso con receptores y transceptores SDR. La herramienta está compuesta principalmente por 3 componentes : la consola dónde puedes visualizar las señales recibidas y transmitidas, un servidor para la configuración remota del software

La herramienta es compatible con dispositivos de los fabricantes más importantes en el sector y, además, continuamente dispone de actualizaciones para mantenerse adaptada a los continuos avances en SDR.



3.2.2.5 Elección de la solución

A continuación se realizará una comparación en términos prácticos de las alternativas analizadas para determinar los motivos de la elección de LabVIEW como plataforma SDR para la implementación del software del proyecto.

Por otro lado también se descarta el uso de SDR-Radio.com, ya que esta solución no constituye un entorno de desarrollo, sino una consola para dispositivos SDR, por lo que no permite la implementación del software del proyecto.

Plataforma	Lenguaje de programación	Coste	Uso de la CPU	Compatibilidad con USRP
LabVIEW	Gráfico	Gratuito para el estudiante	Medio	Muy alta
GNU Radio	Escrito	Gratuito	Bajo	Media
Photos SDR	Escrito	Gratuito	Bajo	Media

Tabla 1: Comparativa soluciones

En la tabla anterior podemos ver una comparación de las tres alternativas potenciales para el desarrollo del trabajo. Se ha escogido LabVIEW por varios motivos. Por un lado su integración con el USRP es muy alta, lo cual mejora la eficiencia del sistema. El entorno de desarrollo usa un lenguaje gráfico, lo cual facilita su aprendizaje además de dar como resultado un software más intuitivo y visual. Por último, la empresa National Instruments proporciona a la UC3M una licencia para el uso gratuito del software por parte de los estudiantes.

3.2.3 Soluciones existentes

A continuación se realizara un análisis de distintas soluciones que permiten simular el funcionamiento del sistema GSM o que permiten visualizar los mensajes intervinientes en el proceso de uso del servicio de SMS.

3.2.3.1 GL's MAPS [8]

GL's MAPS es un simulador de protocolos que funciona sobre IP y que permite simular el intercambio de mensajes y la señalización realizada en GSM siguiendo los estándares 3GPP.

Permite la creación y modificación de distintos escenarios para la realización de pruebas y simulaciones, y no sólo de redes GSM, si no también 3G y 4G.

Es una herramienta orientada a la validación de redes inalámbricas previas al despliegue y puesta en funcionamiento de las mismas.

La diferencia principal con el proyecto a desarrollar es que esta herramienta no permite una simulación tan semejante a la realidad debido a que funciona sobre IP, a diferencia de nuestro proyecto que usa SDR para simular un funcionamiento real.

3.2.3.2 Soluciones online

Existe una gran variedad de herramientas web que permiten la visualización del mensajes enviado en el momento de la transmisión del SMS a partir de un mensaje de texto, el número del centro de servicios y el número del receptor del mensaje. Dichas herramientas bien podrían servir de un modo académico para visualizar la estructura de los mensajes y el modo de formación de estos, pero suponen una simulación muy pobre del sistema ya que no permiten la visualización del resto de mensajes intercambiados, así como su funcionamiento es virtual, sin el uso de dispositivos de radiofrecuencia para una simulación real del sistema. Algunos ejemplos son: "Javascript PDU Converter" [9], "Online SMS PDU Decoder" [10] y "SMSPDU" [11].

3.2.4 Proyectos y publicaciones relacionados

3.2.4.1 *Design & Simulation of GSM FH Transmitter Using SDR Technology* [12]

El proyecto en cuestión trata del diseño y simulación de un transmisor GSM usando la tecnología SDR mediante el uso de MatLab/Simulink.

En el paper del proyecto se realiza un análisis detallado de las señales de entrada y salida obtenidas en la simulación.

3.2.4.2 *Implementación del procedimiento “Location Update” de GSM en plataforma Software Defined Radio* [1]

Este proyecto supone la base del trabajo a desarrollar ya que se han usado varios de los bloques funcionales del software implementado para el mismo.

Consistía en la implementación del proceso realizado en GSM cuando una estación móvil cambia de estación base.

3.3 Marco regulador

El marco dentro del cual se encuentra el trabajo está regido por una serie de restricciones tanto legales como técnicas.

3.3.1 Marco legal

Ya que el proyecto carece de carácter comercial y su aplicación será principalmente académica, desarrollándose dentro de la propia universidad sin difusión de resultados al exterior de la misma, no se aplican regulaciones legales. La única ley dentro del marco legal a tener en cuenta es la Ley de Propiedad Intelectual, la cual protege los derechos de los autores y titulares acerca de sus obras y prestaciones creadas.

3.3.2 Marco Técnico

Dentro del marco tecnológico del proyecto sí que existen una serie de reglas y restricciones a tener en cuenta debido a la reglamentación existente que afecta al dominio público radioeléctrico. Esta serie de normas se recoge en el Código de las Telecomunicaciones [13], que incluye las distintas leyes y decretos dictados intervinientes en el campo de las telecomunicaciones. En concreto, al presente trabajo, le afectan directamente la Ley General de las Telecomunicaciones 9/2004 del 9 de mayo y el Real Decreto 1066/2001 [14].

La primera pretende promover una competencia efectiva en el sector, facilitar la prestación y despliegue de servicios, favorecer la seguridad jurídica y reforzar el control del dominio público radioeléctrico.

El Real Decreto 1066/2001 establece restricciones más concretas acerca de las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.

Todos los equipos presentes en el laboratorio de comunicaciones de la UC3M utilizados durante la realización de este proyecto cumplen con la normativa anteriormente mencionada, siendo posible comprobarlo en sus características técnicas donde se describe detalladamente los valores máximos

alcanzados de los distintos parámetros a tener en cuenta (potencia, frecuencia...), los cuales no superan los valores máximos permitidos por dichas leyes.

3.4 Entorno socio-económico

En el capítulo del estado del arte ya se explicó la situación social actual de las comunicaciones móviles en la que tras el análisis se determinó que la proporción es casi de 1 a 1 en cuanto a líneas móviles por habitante del planeta se refiere. Estos datos indican que nos encontramos en una situación favorable para la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con este campo, como pueden ser los sistemas SDR, de hecho es una necesidad realizar inversiones en el campo de la telefonía móvil.

Por otro lado mediante la aplicación de este TFG en el campo de la docencia, se conseguirá mejorar significativamente, haciéndola más práctica y eficiente. Con el uso de este tipo de sistemas los futuros estudiantes de temas relacionados con las comunicaciones móviles adquirirán una mayor preparación y un mayor conocimiento práctico en este sector.

En lo que se refiere al aspecto económico, desde hace varios años el mundo entero, y más en concreto España está sumida en una crisis económica que afecta a todos los campos. Actualmente el estado ha mejorado con respecto a años anteriores y nos encontramos en un período de recuperación en el que paulatinamente estamos saliendo de dicha crisis. Aun así, siguen apareciendo datos comparativos con la situación existente antes de la crisis, que demuestran que en muchos ámbitos, incluido el de la enseñanza, las inversiones todavía no están a la altura de las realizadas previas a la crisis.

En un informe del 22 de Junio realizado por CCOO [15], se realiza una comparativa de las inversiones en enseñanza entre el 2009, 2013 y la previsión para este año. La inversión total en enseñanza en el año 2009 fue un 25% superior a la de este año. Prueba de ello es el aumento del porcentaje de financiación privada que creció de un 17,6% a un 25,9% del total. Obviando esta parte privada, la inversión pública en la enseñanza universitaria se redujo en 1700 millones de euros, un 18,7%.

La reducción de estas inversiones también afecta al desarrollo del proyecto, ya que si la inversión de capital fuera mayor, las universidades públicas, como es la UC3M podrían disponer de mejores instalaciones e infraestructuras, y en concreto de mejores equipos para el desarrollo de los proyectos. A pesar de ello, los equipos proporcionados por la universidad para el desarrollo del trabajo son perfectamente aptos y útiles para las funcionalidades que se requieren.

3.5 Presupuesto del proyecto

A continuación se describirá el presupuesto del proyecto, que supone la suma de los costes directos (costes materiales más costes humanos), los costes indirectos y el IVA.

3.5.1 Materiales

Para el cálculo del coste del uso de los recursos materiales se ha calculado su amortización mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Tiempo uso} \times \text{Precio}}{\text{Tiempo amortización}}$$

En la siguiente tabla se incluye todo el material utilizado y los valores que permiten calcular el coste de su uso:

Concepto	Unidades	Coste unitario	Tiempo de uso	Tiempo de amortización	Coste total
MacBook Pro Retina 13"	1	1449,00€	170 días	4 años	168,72€
Microsoft Windows 7 Professional 64 bits	1	142,00€	170 días	6 años	11,02€
NI USRP-2920	2	2950,00€	41 días	8 años	82,84€
Adaptador Apple de Thunderbolt a Gigabit Ethernet	1	35,00€	41 días	6 años	0,65€
LabVIEW 2015	1	3350,00€	128 días	4 años	293,70€
VERT 400 Antenna	4	48,00€	41 días	8 años	2,70€
Cable MIMO	1	75,00€	41 días	8 años	1,05€
TOTAL					560,68€

Tabla 2: Costes materiales

3.5.2 Recursos humanos

El personal dedicado a la realización del proyecto incluye al Doctor Ingeniero tutor del TFG y al alumno encargado de su realización.

Concepto	Coste/hora	Horas	Coste total
Doctor Ingeniero	65,00 €/hora	34	2210,00€
Estudiante	35,00 €/hora	340	11900,00€
TOTAL			14110,00€

Tabla 3: Costes humanos

3.5.3 Coste total

Los costes directos son la suma de los costes materiales más los costes humanos, mientras que los costes indirectos son el 20% de los directos.

Concepto	Coste
Costes directos	14670,68€
Costes indirectos	2934,14€
IVA (21%)	3697,01€
TOTAL	21301,83€

Tabla 4: Coste total

3.6 Planificación del proyecto

En primer lugar se identificaron las etapas de desarrollo del proyecto y las tareas a desarrollar en cada una de las etapas. Posteriormente se realizó una estimación del tiempo que conllevaría cada una de ellas teniendo en cuenta que la media de trabajo diario sería de 2 horas. Al final se realizaron diversos ajustes de tiempo para cumplir con los plazos y se identificaron las tareas críticas.

A continuación se describen las etapas y sus tareas en el orden planificado:

- **Documentación y estudio:** Esta etapa comprende todo el proceso de estudio del estándar GSM y del desarrollo teórico del sistema que se va a crear.
 - Estudio del estándar GSM.
 - Creación de mensajes: Esta tarea implica la creación teórica de los mensajes que se van a intercambiar en el proceso a implementar.
- **Comprensión y aprendizaje de las herramientas:** En esta etapa se realizarán tutoriales para el aprendizaje del modo de programación en LabVIEW, además de estudiar el resto de elementos que se van a usar en el proyecto.
 - Aprendizaje LabVIEW: Se realizarán dos tutoriales que enseñan de forma tanto teórica como práctica a programar en LabVIEW.
 - Comprensión software Location Update: Una vez aprendidos los conocimientos básicos sobre programación en LabVIEW se procede a entender el funcionamiento del software que se usará como base y en el que se integrará el proceso del servicio de SMS.
 - Comprensión funcionamiento USRP.
- **Desarrollo de software:** Esta etapa comprende todas las tareas relacionadas con la implementación en LabVIEW del proceso de intercambio de mensajes del servicio de SMS y su integración con el software existente.
 - Sistema de construcción de mensajes.
 - Proceso de intercambio de mensajes.
 - Integración con software Location Update.
- **Pruebas:** En esta etapa se realizarán pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de todos los módulos y funcionalidades del sistema completo.

- Pruebas de construcción de mensajes
- Pruebas de codificación de tramas
- Pruebas de recepción de tramas
- Pruebas del sistema completo
- **Memoria:** La última etapa de desarrollo del proyecto requiere el desarrollo del presente documento.
 - Escritura del borrador: En una primera instancia el documento se hizo en forma de borrador para facilitar las modificaciones.
 - Desarrollo del documento final: Una vez escrita toda la información en el borrador, se debe dar formato al documento antes de su presentación.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Gantt de la planificación descrita:

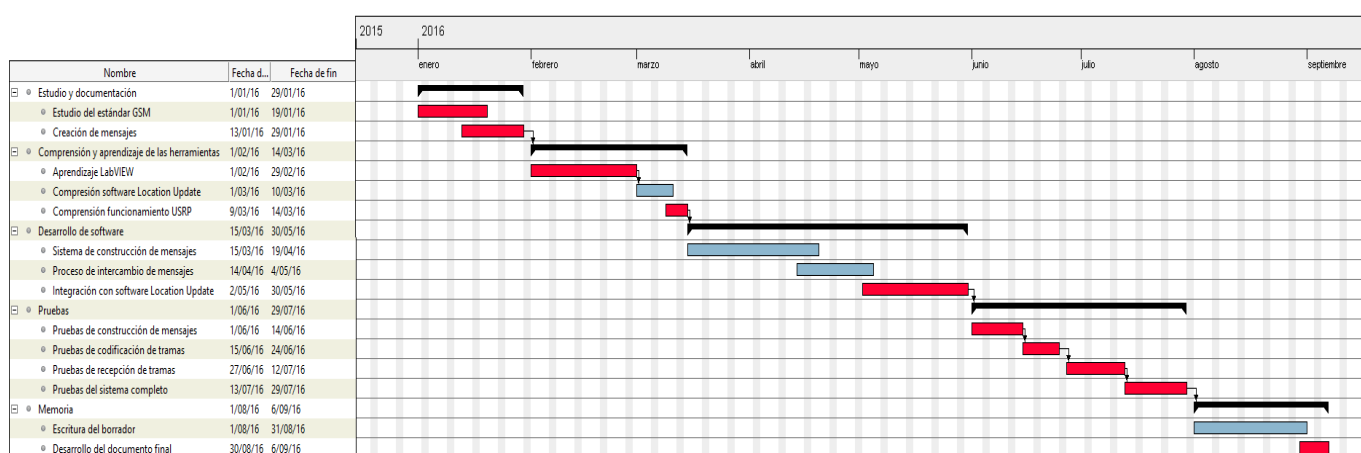


Figura 5: Diagrama de Gantt del proyecto

En rojo se han marcado las tareas críticas, las cuales si se retrasarán, supondrían un retraso en el desarrollo de todo el proyecto.

4. GSM

En este capítulo se procederá a una descripción del estándar GSM enfatizando los puntos que más influyen en el presente proyecto.

4.1 Historia

El estándar GSM comenzó a desarrollarse en 1982 por un grupo creado por el CEPT denominado GSM cuyo objetivo era desarrollar un estándar europeo de telefonía móvil digital.

A principios de los 90 se terminaron las especificaciones del estándar GSM-900, y, un año más tarde, se desarrolló el estándar DCS-1800. Posteriormente al lanzamiento de estos estándares se presentaron los primeros equipos de telefonía GSM.

En 1992 se crearon las primeras redes GSM-900 y se pusieron a la venta los primeros terminales móviles GSM.

Ya en el año 2000 se comenzó a desarrollar el estándar de tercera generación (3G), que sería introducido en el año siguiente como UMTS.

4.2 Arquitectura de red

En la siguiente figura podemos observar un esquema de la arquitectura de la red GSM:

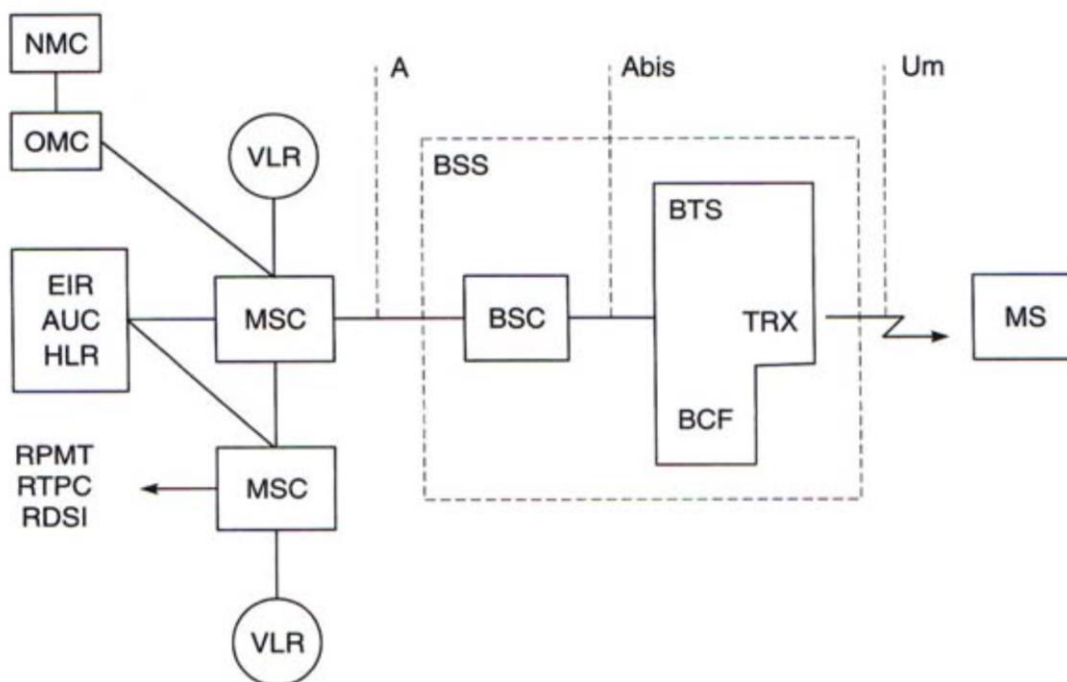


Figura 6: Arquitectura GSM [16]

La arquitectura de la red está dividida en un principio en tres grandes subsistemas:

- Estación móvil (MS).
- Subsistema de estación base (BSS).
- Subsistema de red (Núcleo de la red).

A su vez cada uno de estos subsistemas está formado por una serie de entidades encargadas de realizar todas las funciones propias del subsistema en cuestión.

4.2.1 Estación móvil

Este subsistema está formado típicamente por el teléfono móvil que se encuentra conectado a la red. Sus componentes principales son:

1. Equipo móvil (ME): Se encarga de realizar todas las funciones del terminal, incluyendo las de recepción, procesamiento y transmisión de datos. Contiene el IMEI, el cual es un código único que identifica al aparato a nivel mundial. En el momento de la conexión a la red el IMEI es transmitido por el aparato.
2. Módulo de identidad del abonado (SIM): Este módulo contiene todos los datos identificativos del abonado a la línea perteneciente al terminal móvil en cuestión. En GSM hay una distinción entre el número de teléfono y la identidad del subscriptor. Esta última viene determinada por el IMSI, el cual es un código de identificación único para cada abonado, que permite su identificación a través de la red.

4.2.1.1 Funciones

1. Comunicación radio entre el terminal y la red. Incluye la transmisión y recepción tanto de tráfico de usuario como de señalización.
2. Inicia el proceso de Location Update mediante el cual se realiza un seguimiento de las estaciones base.
3. Procesado de datos y señales de voz.

La estación móvil será una de las partes simuladas en este proyecto.

4.2.2 Subsistema de estación base (BSS)

Este subsistema comprende todos los elementos pertenecientes a la estación base y a sus funciones ofrecidas. Está compuesto por:

- Transceptores de la estación base (BTS): Son los encargados de realizar las transmisiones y de recibir las señales referentes a la estación base.
- Controlador de estación base (BSC): Controlan de forma centralizada los BTS de la estación base y además conectan con el núcleo de la red.

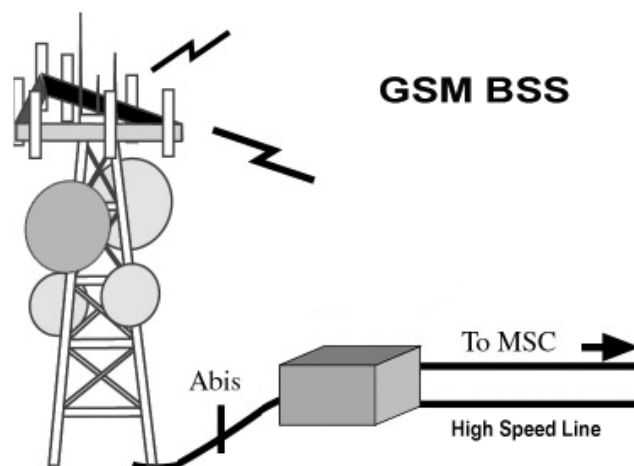


Figura 7: Subsistema de estación base [17]

4.2.2.1 Funciones

1. Codificación, cifrado, multiplexación y modulación de las señales radio transmitidas.
2. Adaptación de tasa binaria.
3. Sincronización de frecuencias y tiempos.
4. Decodificación, descifrado y ecualización de las señales radio recibidas.
5. Concentrado de tráfico proveniente del núcleo de red.
6. Reasignación de frecuencias.
7. Gestión de la energía.

La estación base será una de las partes simuladas en este proyecto.

4.2.3 Subsistema de red

Dentro de este subsistema se encuentran agrupadas todas las entidades intervinientes en el núcleo de la red GSM. Estas entidades son:

1. Centro de conmutación móvil (MSC): Se encarga de gestionar las llamadas entrantes y salientes, y, además, conecta con otros tipos de redes como pueden ser RDSI, RTPC...
2. Registro de visitantes (VLR): Es un registro en el que se inscriben temporalmente los abonados que se encuentran en la zona gestionada por un MSC.
3. Registro doméstico de abonado (HLR): Es una base de datos de información permanente de abonados. Contiene el IMSI, información de localización, tipo de abono y tarifa, información sobre servicios suplementarios y el MSISDN.
4. Centro de autenticación (AUC): Almacena información acerca de la identidad de los abonados y su equipo para la autenticación de las llamadas.
5. Registro de identidad de equipos (EIR): Es una base de datos que almacena el IMEI de los terminales, con el objetivo de reducir el robo y el fraude de los mismos.
6. Centro de operaciones y mantenimiento (OMC): Se encarga de tareas de mantenimiento y monitorización tales como, gestión de la seguridad, configuración de la red y monitorización del rendimiento.

7. Centro de gestión de la red (NMC): Es la entidad responsable de todas las funciones del sistema de administración técnica.

4.2.3.1 Funciones

1. Gestión y conmutación de las llamadas.
2. Comunicación con redes de otros tipos.
3. Comunicación y señalización con la estación base.
4. Registro de abonados.
5. Registro de equipos.
6. Autenticación de las llamadas.
7. Mantenimiento e implementación de la seguridad.
8. Monitorización y mantenimiento de la red GSM.

4.3 Servicios

Los servicios que proporciona el estándar GSM están destinados a cubrir las necesidades de la primera generación de telefonía móvil, y se agrupan en servicios básicos y suplementarios.

4.3.1 Servicios básicos

Este tipo de servicios se subdivide en teleservicios y servicios portadores.

4.3.1.1 Teleservicios

En esta categoría se incluyen los servicios que permiten la comunicación entre abonados.

1. Telefonía digital: Permite la recepción y el envío de llamadas para la comunicación verbal entre abonados de todo el mundo, ya sean fijos o móviles. Proporciona una velocidad total de 13 kbps.
2. Llamadas de emergencia: Permite la realización de llamadas sin tener la tarjeta SIM introducida en el terminal.
3. Facsimil: Posibilita la comunicación con aparatos FAX del grupo 3.
4. Servicio de mensajes cortos (SMS): Permite el envío y recepción de mensajes de texto de hasta 160 caracteres.
5. Buzón de voz: Proporciona al abonado un contestador controlado por el mismo.
6. Buzón de fax: Posibilita la recepción de mensajes de fax en cualquier dispositivo a través del terminal móvil.

4.3.1.2 Servicios portadores

Incluyen los servicios que soportan la transmisión de datos. Proporcionan capacidad de transporte de datos de modo síncrono o asíncrono, mediante conmutación de circuitos o paquetes y con velocidades de hasta 9,6 kbps.

1. Tráfico hacia la red telefónica (PSTN): Posibilita el envío de datos hacia la red telefónica pública para la comunicación con abonados fijos.
2. Tráfico hacia la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI).
3. Comunicación con otras redes de datos asíncronos.

4.3.2 Servicios suplementarios

Este tipo de servicios están diseñados para completar o modificar las funcionalidades de los servicios básicos.

- 5 Desvío de llamadas: Facilita el desvío de llamadas entrantes hacia otro terminal con otro número de teléfono.
- 6 Restricción de llamadas: Se pueden restringir tanto las llamadas salientes como las entrantes. Además, se puede escoger las redes origen o destino para la restricción.
- 7 Identificación del abonado llamante.
- 8 Tarificación: Permite la aplicación de bonificaciones al abonado según su tarifa, por ejemplo, llamadas gratuitas, cobro revertido...
- 9 Llamada en espera.
- 10 Multiconferencia: Permite el establecimiento de llamadas en las que participen de 3 a 6 abonados.

4.4 Interfaz radio

En el proyecto se realizará la transmisión y recepción mediante radiofrecuencia de una serie de mensajes que simulan los procesos de asignación de canal, autenticación, "Location Update", transmisión de un SMS y liberación de canal. Por lo tanto es importante conocer la interfaz radio así como sus procedimientos y elementos intervinientes.

La interfaz radio existente entre la estación móvil y la estación base se denomina Um. Está dividida en tres capas, la capa física, la capa de enlace de datos y la capa de red, las cuales se describirán a continuación. Se hará mayor énfasis en la descripción de la capa física debido a su gran peso en el proyecto.

4.4.1 Capa física (L1)

Esta capa se encuentra definida en las especificaciones del estándar GSM, en concreto en las series 05. Está dividida en tres subcapas: módem radio, multiplexación y sincronización, y codificación.

4.4.1.1 Módem radio

Dentro de las series antes definidas se encuentra descrita en las especificaciones GSM 05.04 [18] y GSM 05.05 [19].

Esta capa recoge todos los procesos que se producen en el transceptor radio.

4.4.1.1.1 Modulación

La modulación usada en GSM es la denominada GMSK. Al igual que la modulación MSK, es una modulación por desplazamiento de fase, pero con la diferencia de que los datos en formato digital pasan por un filtro paso bajo gaussiano antes de llegar al circuito modulador.

Esta modulación es muy usada por su alta eficiencia espectral, porque proporciona continuidad de fase y porque el modulador y el demodulador son sencillos.

Ventajas frente a la modulación MSK tradicional:

1. Las transiciones de fase de la señal son más suaves, por lo que el ancho de banda necesario para su transmisión es menor.

2. La interferencia entre portadoras que se encuentran fuera de la banda también se reduce en casos de frecuencias próximas.

Desventajas frente a la modulación MSK tradicional:

1. Presenta menor inmunidad al ruido.
2. Debido a que la duración del pulso a la salida del filtro gaussiano es mayor es más probable que se produzcan interferencias entre símbolos.
3. Su implementación es más compleja.

Como resultado esta modulación con 1 bit por símbolo produce de 13 a 48 MHz de tasa de transmisión de símbolos con una separación de canales de 200 KHz.

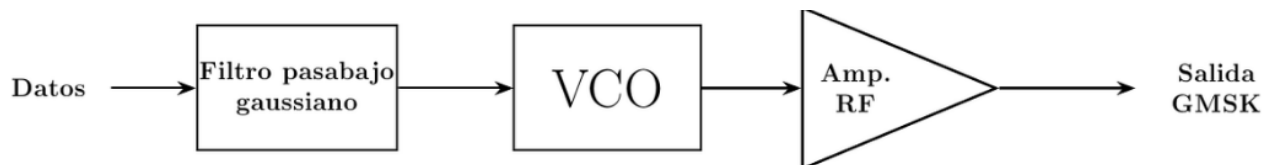


Figura 8: Esquema GMSK [20]

4.4.1.1.2 Ráfagas

En GSM los bits de información se transmiten en forma de tramas dentro de canales físicos y lógicos. Para cada canal se realiza una multiplexación en tiempo en varios intervalos (timeslots), y en cada timeslot se transmiten los bits en forma de ráfagas. Los canales, la estructura de tramas y la multiplexación se explicarán más adelante.

Ráfaga es la denominación que se le da a la secuencia de bits transmitida en un timeslot. Constan de un número concreto de bits más un período determinado de guarda. Según su uso hay varios tipos de ráfagas definidos:

Ráfaga normal de tráfico (NB): Se usa para las comunicaciones estándar, por ejemplo puede contener datos de voz normalizados o los mensajes referentes al servicio de SMS.

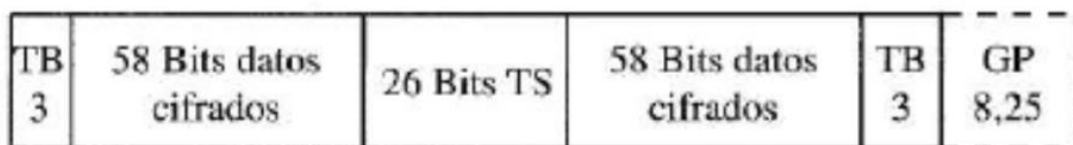


Figura 9: Normal Burst [21]

-Ráfaga de corrección de frecuencia (FB): Se usa para la sincronización del móvil ajustando su frecuencia.

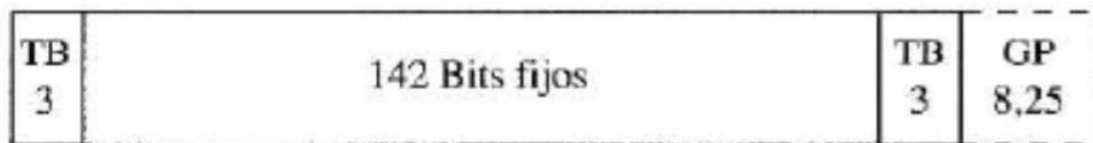


Figura 10: Frequency Burst [21]

-Ráfaga de sincronización (SB): Se usa para proveer sincronización en tiempo entre los terminales móviles y la red.

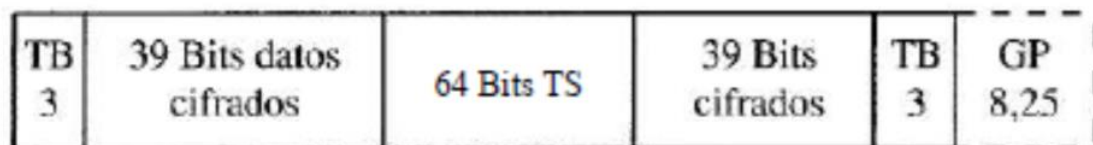


Figura 11: Synchronization Burst [21]

-Ráfaga de relleno (DB): Esta ráfaga no contiene información útil. Se usa para mantener los canales ocupados cuando no se están usando para la transmisión de datos útiles.

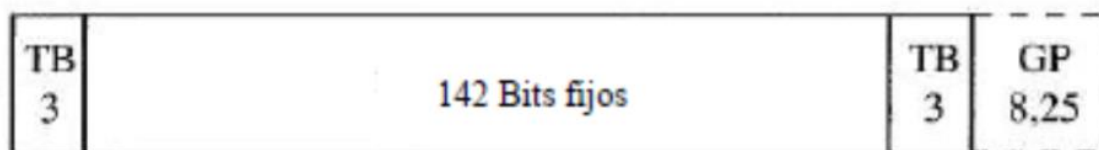


Figura 12: Dummy Burst [21]

-Ráfaga de acceso (AB): Es usada por el canal de acceso aleatorio cuando se accede a la red.

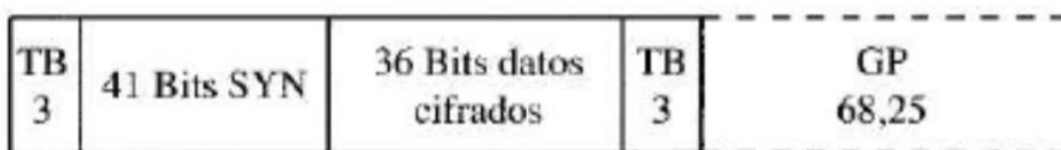


Figura 13: Acces Burst [21]

4.4.1.2 Multiplexación y sincronización

Definida en las especificaciones GSM 05.02 [22].

4.4.1.2.1 Acceso múltiple

En GSM se usan a la vez dos métodos de multiacceso para gestionar el acceso de los usuarios a la interfaz radio y el uso de los canales de frecuencias.

Por un lado se usa acceso por división en frecuencia (FDMA) para la división de los canales, los cuales corresponden cada uno con una frecuencia y están separados 200 kHz entre sí como ya se mencionó antes.

Cada canal obtenido mediante FDMA es usado por varios usuarios a la vez, por lo tanto se usa acceso por división en tiempo para gestionar su uso. Mediante este método se establecen tramas TDMA de una duración de 4,615 ms, las cuales a su vez son divididas en 8 intervalos de tiempo o timeslots de 0,577 ms cada uno. Los timeslots van desde el TN0 al TN7.

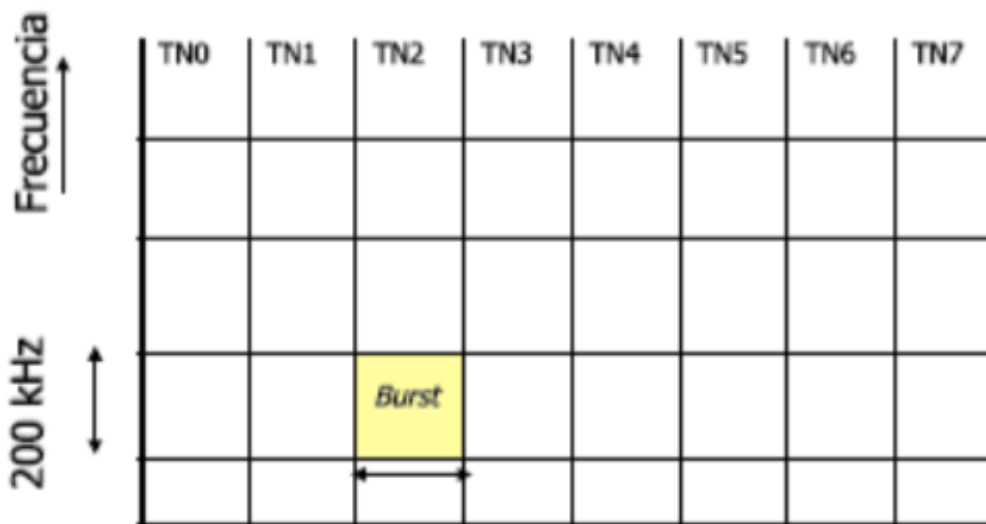


Figura 14: FDMA/TDMA [21]

El resultado de la combinación de estos dos métodos es que cada usuario dispone de un timeslot concreto para la transmisión y recepción de sus ráfagas. Para evitar que el usuario transmita y reciba en el mismo timeslot, existe un desplazamiento de tres intervalos entre el enlace ascendente y el descendente.

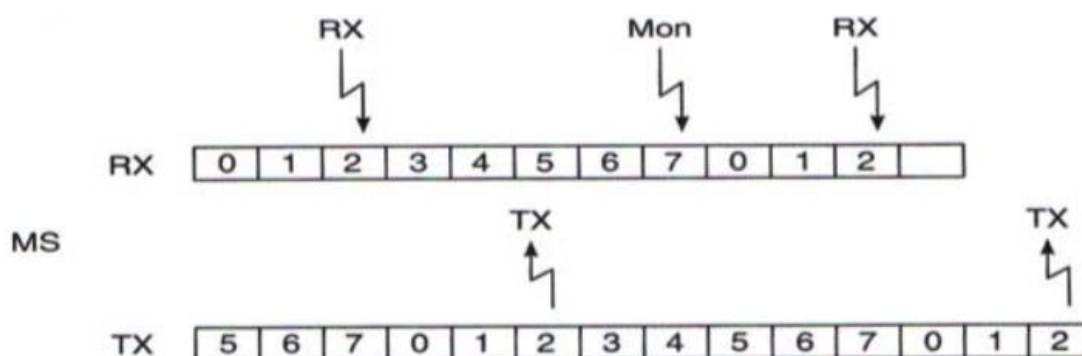


Figura 15: Desplazamiento Timeslots GSM [16]

4.4.1.2.2 Agrupación de tramas

Antes de realizar la transmisión a través de la interfaz radio las tramas antes mencionado son agrupadas entre sí. De este modo se pueden dar lugar a dos agrupaciones según su uso: las

multitramas de 26 tramas, las cuales son usadas para canales de tráfico, o, las multitramas de 51 tramas, que se utilizan para señalización, inicio o fin de llamada, identificación del móvil...

Las multitramas también se agrupan entre sí formando supertramas, que contienen un total de 1326 tramas, por lo cual pueden estar formadas de 51 multitramas de 26 o, por 26 multitramas de 51.

Por último las hipertramas son agrupaciones de 2048 supertramas, por lo que contienen un total de 2715648 tramas.

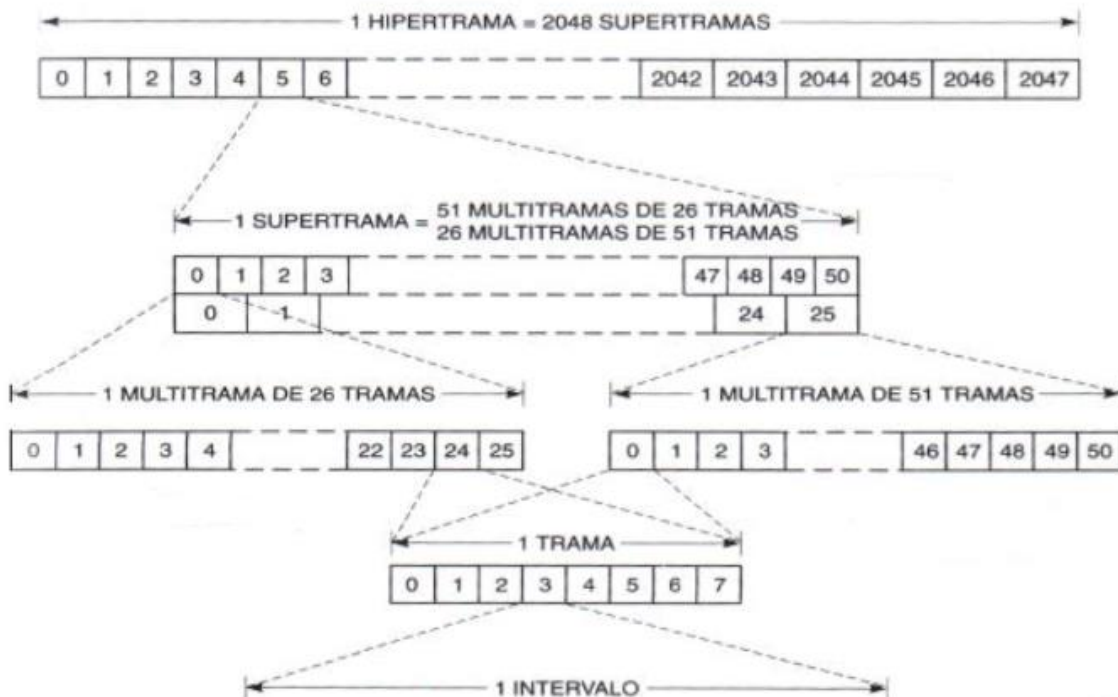


Figura 16: Agrupación de tramas GSM [16]

4.4.1.3 Codificación

Se describe en las especificaciones del estándar GSM 05.03 [23].

Previamente a la transmisión de los datos, estos pasan por un proceso de codificación. Este proceso se divide en dos partes:

4.4.1.3.1 Codificación

Dependiendo del tipo de datos hay dos tipos de codificación:

1. Codificación de fuente: Se emplea en canales de voz. Se utiliza el códec vocal RPE-LTP. Este códec produce 260 bits cada 20 ms, lo que da lugar a una velocidad de transmisión de 13 kbps.
2. Codificación de canal: Esta codificación provee forward error correction (FEC), la cual es una técnica usada para controlar los errores la transmisión de los datos. Para ello se introduce redundancia usando un código de corrección de errores (ECC).

Cada canal codificado usa un código bloque de paridad, normalmente un código Fire y un código convolucional.

Tras el proceso de codificación, se convierten 184 bits de información en 456. En la siguiente figura se muestra el proceso de codificación:

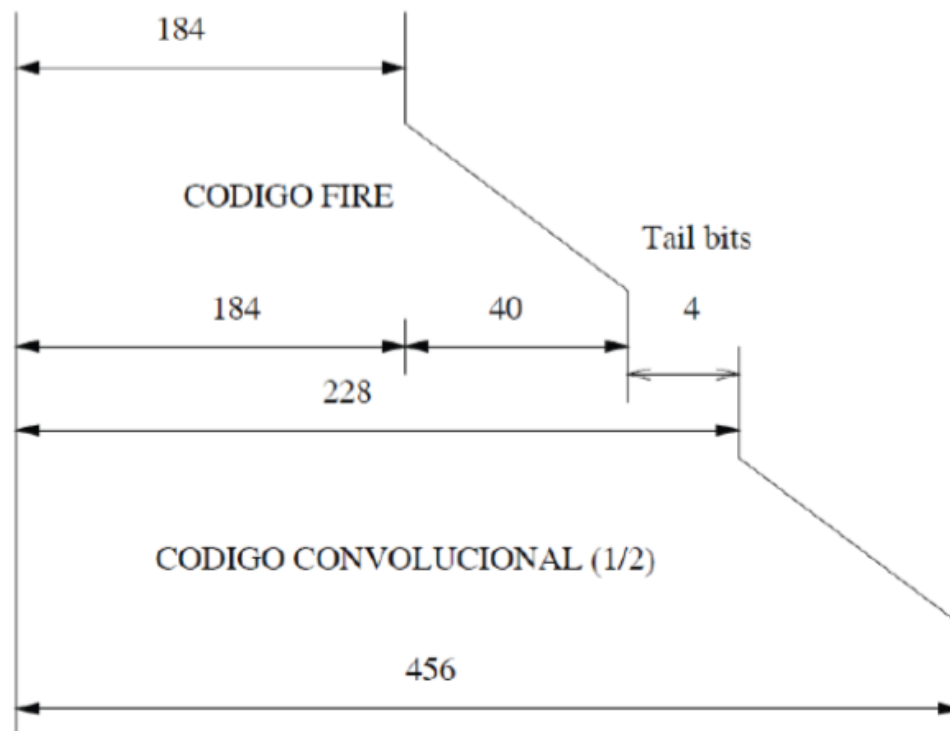


Figura 17: Codificación en GSM [21]

A los 184 bits de información se les aplica un código FIRE que da lugar a una secuencia de 224 bits. A estos se le añaden 4 bits de cola. Por último se aplica un código convolucional de $\frac{1}{2}$ que da lugar a los 456 bits finales listos para ser transmitidos.

4.4.1.3.2 Entrelazado

Tras la realización del proceso de codificación anteriormente descrito se redistribuyen las secuencias de bits dentro de las tramas.

Para canales de tráfico transmitidos mediante Normal Bursts, que será el caso que se produzca en la transmisión de los mensajes del servicio de SMS, tras el proceso de codificación y de entrelazado resultarán 456 bits que serán enviados en 4 tramas, cada una de las cuales transportará 114 bits de información.

4.4.1.4 Canales

Sus especificaciones se encuentran en GSM 04.03 [24].

Los timeslots de cada trama constituyen un canal físico, mientras que cada tipo de información enviada por estos canales constituye un canal lógico. Los canales lógicos se dividen en dos categorías, canales de tráfico y canales de control.

4.4.1.4.1 Canales de tráfico (TCH)

Los forman dos portadoras y dos timeslots para efectuar la comunicación. Se usan para la transmisión de voz y de datos. Según la información que lleven y la velocidad a la que se transmiten existen varios tipos:

1. Voz a velocidad total (TCH/F).
2. Voz a velocidad mitad (TCH/H).
3. Datos a velocidad total de 2,4 kbps.
4. Datos a velocidad total de 4,8 kbps.
5. Datos a velocidad total de 9,6 kbps.
6. Datos a velocidad mitad de 2,4 kbps.
7. Datos a velocidad mitad de 4,8 kbps.

4.4.1.4.2 Canales de señalización (CCH)

Sirven para la transmisión de mensajes relacionados con tareas de control y señalización. Están divididos en tres categorías dependiendo de su uso: canales de difusión, canales comunes y canales dedicados.

4.4.1.4.2.1 Canales de difusión

Facilitan información general de orientación y sincronización. Existen los siguientes:

1. Broadcast Control Channel (BCH): Lleva información general de la red y la celda.
2. Frequency Correction Channel (FCH): Lleva información sobre la frecuencia de la portadora usada por la estación móvil.
3. Synchronization Channel (SCH): Lleva información sobre la sincronización de trama y el identificador de la estación base.

4.4.1.4.2.2 Canales comunes (CCCH)

Se usan para el control del acceso al sistema. Existen los siguientes:

1. Random Access Channel (RACH): Llevan las peticiones de la MS no programadas a la red.
2. Paging Channel (PCH): Se usan para notificar al móvil de la existencia de una llamada para la misma.
3. Access Grant Channel (AGCH): Su uso está dedicado a la asignación de recursos al móvil que ha solicitado establecer una comunicación.

4.4.1.4.2.3 Canales dedicados

Se asignan a la MS previamente a la realización de una llamada. Existen los siguientes:

1. Standalone Dedicated Control Channel (SDCCH): Sirven para el intercambio de datos entre la MS y la BS antes de tener un canal de tráfico asignado.
2. Slow Associated Control Channel (SACCH): Se transmite señalización relacionada con los datos transmitidos por el SDCCH.
3. Fast Associated Control Channel (FACCH): Se utiliza para la transmisión de mensajes urgentes, como por ejemplo el handover.

4.4.2 Capa de enlace de datos (L2)

Podemos encontrar la descripción en los documentos GSM 04.05 [25] y 04.06 [26].

La capa de enlace de datos (DLL) recoge los procedimientos previos a la utilización de los distintos servicios que ofrece GSM. Por ejemplo en el proyecto, se usará para la notificación por parte del móvil a la BS de que se va a usar el servicio de SMS. Esta capa también ofrece servicios a la capa superior (L3) que son proveídos por la capa física, como por ejemplo el establecimiento de la conexión.

Esta capa usa el protocolo LAPDm. Para la identificación de los servicios proveídos por la capa física o por la propia capa de enlace de datos se usan identificadores denominados SAPI.

4.4.3 Capa de red (L3)

Descrita en las especificaciones GSM 04.07 [27] y 04.08 [28].

Esta capa se encarga de la gestión y la señalización derivada del uso de los servicios proveídos. Se divide en tres subcapas:

- 1 Recursos radio (RR): Gestiona la asignación y la liberación de los canales lógicos.
- 2 Gestión de la movilidad (MM): En esta subcapa se realizan los procesos de autenticación y seguimiento de la estación móvil a través de las distintas celdas de la red.
- 3 Control de llamadas (CC): Mediante esta subcapa se realizan las conexiones de las distintas llamadas.

4.5 Seguridad

En GSM la seguridad consiste en la autenticación de la identidad del abonado, la confidencialidad de su identidad, la confidencialidad de la señalización intercambiada y la confidencialidad de los datos.

Para identificarse, el abonado utiliza el IMSI junto con su clave de autenticación (Ki). En el momento de la autenticación se utiliza un mecanismo de desafío-respuesta: la BS envía el RAND, el cual es un número aleatorio de 128 bits, a partir del cifrado del RAND se calcula la SRES firmada de 32 bits usando Ki con el algoritmo de cifrado A3, y, posteriormente la red repite este proceso para verificar su la identidad del usuario.

Para cifrar las comunicaciones de datos y voz entre la MS y la BS se utiliza el algoritmo A5 con una clave, Kc, generada mediante el número RAND, la clave Ki y el algoritmo A8 contenido en la SIM del abonado.

Para proteger la confidencialidad del abonado se utiliza la TMSI, que es recibida por la MS una vez autenticada con la red. La TMSI sólo es válida en la localización donde se le envió a la MS.

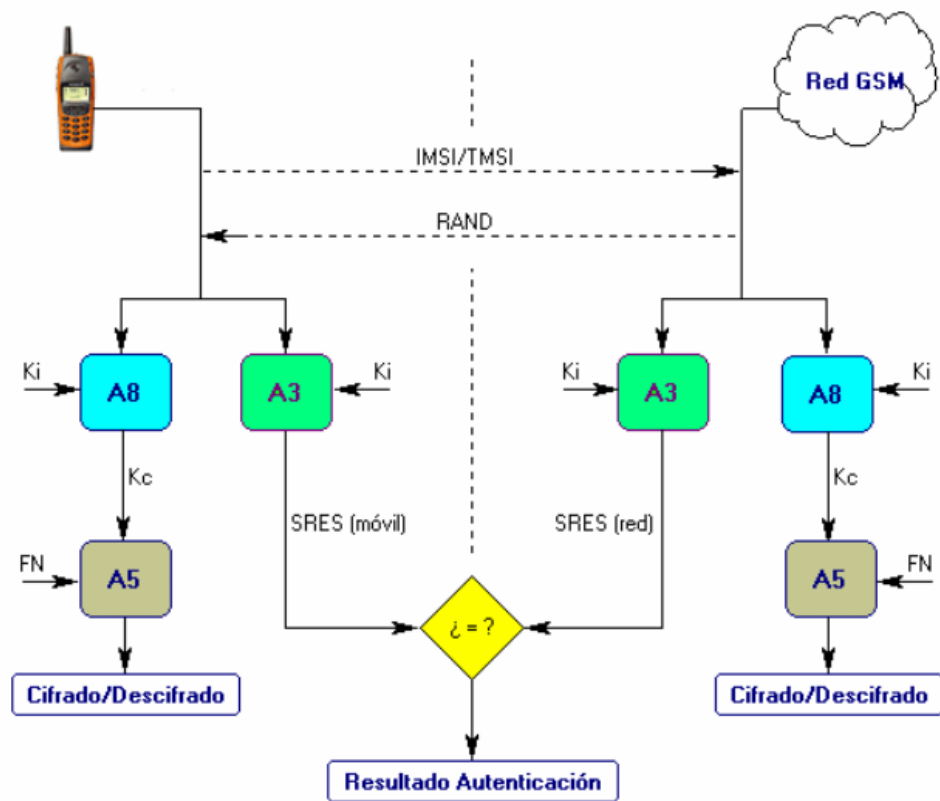


Figura 18: Seguridad en GSM

5. MATERIAL UTILIZADO

La plataforma SDR necesita de un software de desarrollo del programa y de un transceptor para la transmisión y recepción de los datos. En este trabajo en concreto, se ha utilizado el software LabVIEW para el desarrollo del programa que analiza, procesa y prepara los datos, y, por otro lado 2 transceptores NI USRP-2920 para transmitir y recibir datos, uno para la MS, y otro para la BS. Los transceptores se han usado en los laboratorios de comunicaciones de la UC3M, en concreto en el campus de la EPS (Escuela Politécnica Superior), situado en Leganés. A continuación se describirán todos los elementos usados durante la realización del proyecto.

5.1 Ordenador portátil

Durante el transcurso del trabajo se ha utilizado para la utilización de LabVIEW y de los transceptores un ordenador portátil MacBook Pro Retina de 13 pulgadas de mediados del 2014. El ordenador tiene las siguientes características:

Procesador Intel Core i5 a 2,6 GHz.

Memoria RAM DDR3 de 8gb a 1600 MHz.

Disco duro SSD de 128 GB.

En cuanto al sistema operativo, de fábrica traía Mac OS X El Capitán, pero la licencia de estudiante de la que dispone la UC3M para proporcionar a los estudiantes LabVIEW, sólo proporciona el software para Windows, por lo que previamente al comienzo del proyecto, se realizó una partición con BootCamp en el equipo. La partición cuenta con 40 GB de capacidad y el sistema operativo es Windows 7 Professional de 64 bits.



Figura 19: MacBook Pro Retina 13" [29]

5.2 LabVIEW [30]

LabVIEW es un entorno de desarrollo diseñado para impulsar la productividad en los proyectos científicos y de ingeniería. Este software está diseñado para poder integrarse perfectamente con todo tipo de hardware y otros programas de software.

El lenguaje de programación de este entorno es un lenguaje de programación gráfico. Se utiliza un modelo de flujo de datos en vez de una ordenada de líneas de código, lo que permite desarrollar los programas de un modo visual a la vez que fluyen las ideas y los pensamientos del programador. Las secuencias de líneas de código se sustituyen por bloques que realizan distintas funciones. Estos bloques pueden ahorrar un gran número de líneas de código en texto. El orden de ejecución se determina por su modelo de flujo de datos, en el cual, los bloques funcionales del programa están conectados entre sí mediante “cables”, los cuales son los que determinan el orden de ejecución de los bloques. Este método de programación permite un aprendizaje más rápido y comprensible, ya que no requiere memorizar largas líneas de código para la realización de una tarea.

Otra ventaja de este software es la estructura de sus programas, los cuales están compuestos principalmente por dos partes, un panel frontal y un diagrama de bloques. Esto proporciona al consumidor del mismo, un uso más visual e intuitivo del software desarrollado.

- Panel frontal: es la interfaz del usuario, donde se introducen los inputs del programa desarrollado, y, posterior a su ejecución, donde se presentan las salidas del mismo. Los inputs se introducen a través de controles, y los outputs se presentan en indicadores.

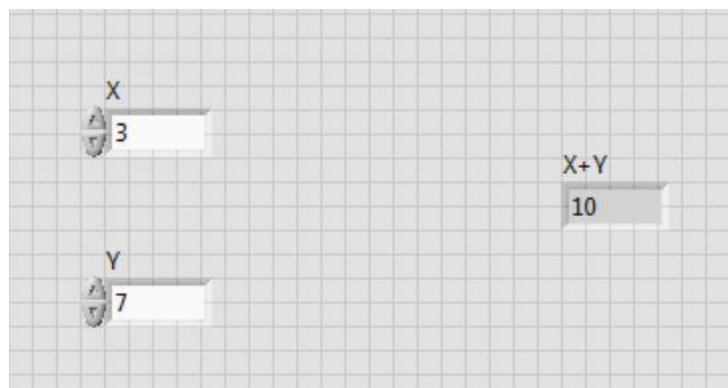


Figura 20: Panel frontal LabVIEW

- Diagrama de bloques: representa el backend del programa, es decir, toda la estructura funcional del mismo. La funcionalidad completa del programa se implementa mediante la interconexión de bloques funcionales. Los controles y los indicadores del panel frontal tienen sus propios bloques en el diagrama, de este modo es como se conecta el panel frontal con el diagrama de bloques.

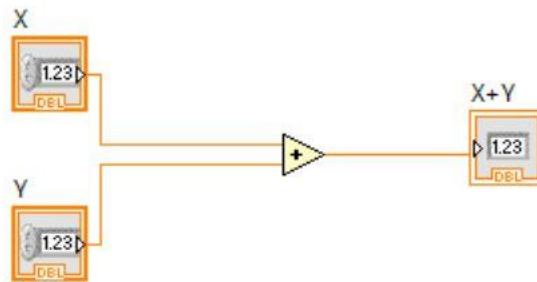


Figura 21: Diagrama de bloques LabVIEW

Por otro lado LabVIEW dispone de drivers y funciones específicas para el envío, la recepción, y demás funciones a realizar con los transceptores NI USRP, lo cual facilita su integración en el software.

5.3 NI USRP 2920 [31]

El transceptor NI USRP 2920 (Universal Software Radio Peripherals) junto con la plataforma LabVIEW permite crear sistemas SDR.



Figura 22: NI-USRP 2920 [31]

Proporciona una frecuencia ajustable desde 50 MHz hasta 2.2 GHz, lo que permite usar la cualquiera de las bandas definidas en GSM, que van desde la banda de 380 MHz hasta la banda de 1900 MHz. En este proyecto en cuestión se usará las frecuencias de 600 MHz para el uplink y 645 MHz para el downlink.

El ancho de banda máximo proporcionado por el USRP es de 20 MHz, cuando lo requerido en GSM son 200 KHz para cada canal.

A las frecuencias usadas en el trabajo el USRP tiene una potencia máxima de 100 mW, lo que cumple con las restricciones de emisiones establecidas descritas en el marco técnico del capítulo 2 del proyecto.

Los transceptores se conectan al pc mediante Ethernet. A la hora de montar al sistema en el laboratorio para realizar el testing del software implementado hubo que adquirir un adaptador de puerto Thunderbolt a Ethernet ya que el portátil usado en el proyecto no dispone de puertos Ethernet.

Por otra parte en el trabajo se usarán dos USRP, uno para la simulación de la MS y otro para la simulación de la BS, pero ambos se controlarán desde el mismo PC. Para poder hacerlo, los USRP se conectan entre sí mediante el cable MIMO.

Por último, para la transmisión y recepción por radiofrecuencia se usarán 4 antenas VERT-400, se conectarán en cada USRP de la siguiente forma: una al puerto TX1/RX1 para transmisión y otra al puerto RX2 para recepción.

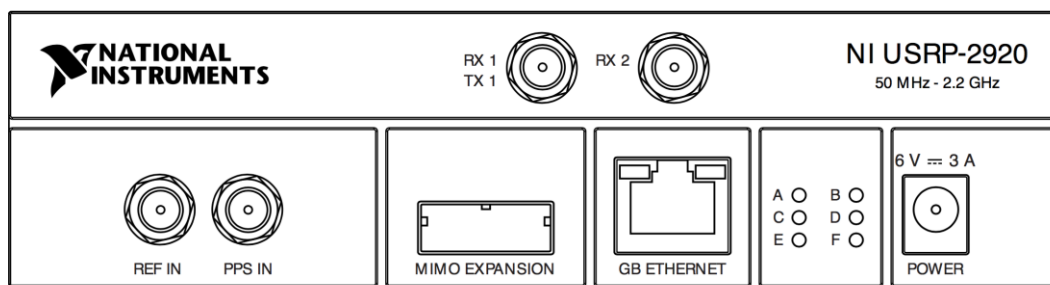


Figura 23: Panel de conexiones USRP [32]

En la figura anterior podemos ver el aspecto del panel frontal del USRP, en la que se ven los puertos anteriormente mencionados.

6. DESARROLLO DEL SOFTWARE

A continuación se describirá todo el proceso de desarrollo del software que implementa las funcionalidades del trabajo.

6.1 Planteamiento

El propósito principal de este proyecto es implementar mediante SDR todo el procedimiento necesario para la transmisión de un SMS desde la estación móvil.

Es necesario mencionar en primer lugar que se han usado como base el TFG de Fernando Rabadán [1], en el que se encontraba implementado el procedimiento de “Location Update”. Por ello este trabajo se integrará en dicho TFG y en el proceso correspondiente de intercambio de mensajes.

Para realizar el estudio del servicio de SMS se han usado los documentos del estándar GSM disponibles a través de la web oficial del ETSI. Se han usado los siguientes documentos:

- **GSM 03.38:** Alphabets and language-specific information [33].
- **GSM 03.40:** Technical realization of the Short Message Service (SMS) Point-to-Point (PP) [34].
- **GSM 04.04:** Layer 1 - General Requirements [35].
- **GSM 04.06:** Mobile Station – Base Station System (MS-BSS) interface data link specification [26].
- **GSM 04.07:** Mobile radio interface signalling layer 3. General aspects [27].
- **GSM 04.08:** Mobile radio interface layer 3 specification [28].
- **GSM 04.11:** Point-to-Point (PP) Short Message Service (SMS). Support on Mobile Radio Interface [36].
- **GSM 04.80:** Supplementary services specification. Formats and coding [37].

El proceso de intercambio de mensajes que se realiza para la transmisión de un SMS es el siguiente:

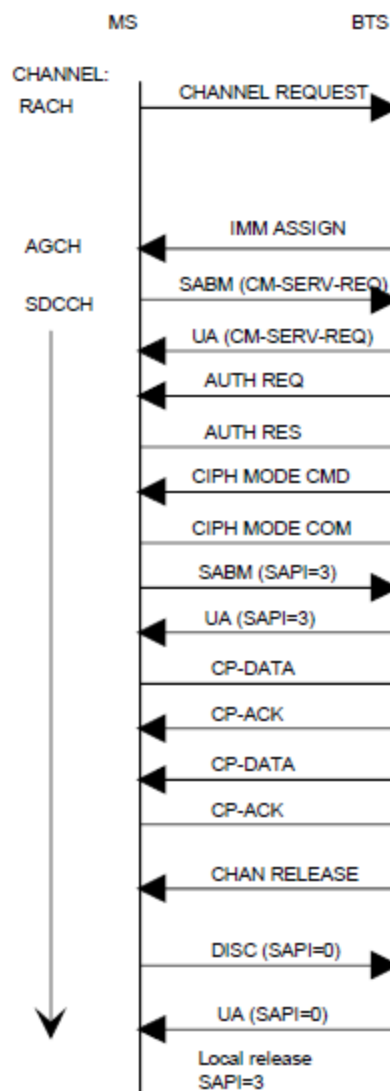


Figura 24: Proceso de intercambio de mensajes [36]

En la figura anterior se pueden ver los mensajes intercambiados. Para cada uno de ellos se sigue siempre el mismo procedimiento:

1. Obtención de los datos introducidos por el usuario.
2. Traducción a bits de los datos obtenidos.
3. Construcción del mensaje.
4. Codificación del mensaje correspondiente al canal que se use para su transmisión.
5. División del mensaje en partes, cada parte correspondiente a una trama a enviar para el mensaje en cuestión.
6. Cada división del mensaje se incluye en el tipo de ráfaga que se corresponda.
7. Modulación de la ráfaga.
8. La ráfaga modulada se incluye en un slot y posteriormente se unen 8 slots para formar una trama completa.
9. Envío de las tramas formadas con el USRP.
10. Recepción de las tramas con el USRP.

11. Se buscan las ráfagas dentro del buffer de bits recibidos por el USRP correspondiente al receptor.
12. Para cada ráfaga recibida se eliminan los bits correspondientes a la ráfaga.
13. Se unen los bits obtenidos de cada ráfaga para formar el mensaje codificado.
14. Se decodifica el mensaje para eliminar los bits correspondientes al canal.

Todos los mensajes excepto los CP-DATA se transmiten en 4 tramas, los CP-DATA se transmiten en 5.

Para buscar las ráfagas correspondientes a los mensajes que no pertenecen a los CP-DATA se busca un patrón conocido y se va comparando con el buffer recibido.

Para los mensajes CP-DATA, debido a que no caben dentro de un canal SDCCH, sino que, como mínimo, son dos, y a que, gran parte de la información contenida es desconocida, se usa un procedimiento distinto para su búsqueda. Posterior a la división del mensaje en partes, y anterior a la creación de las ráfagas, se incluyen cabeceras al principio de cada división. En el receptor se buscan estas cabeceras para identificar las ráfagas pertenecientes al mensaje CP-DATA en cuestión. Las cabeceras siguen un orden secuencial para poder recibirlas en el orden adecuado. La cabecera de la última ráfaga correspondiente al mensaje CP-DATA no sigue el orden anteriormente descrito, para que el receptor pueda determinar cuándo debe dejar de recibir ráfagas correspondientes al mismo mensaje.

6.2 Diseño de la solución

El programa completo se ha dividido en varias partes:

1. Creación de los mensajes: Esta parte comprende la implementación de todos los .vi encargados de construir el mensaje.
2. Codificación del canal lógico: En esta parte se incluyen todos los boques funcionales que crean el canal a partir del mensaje a transmitir.
3. Codificación de las ráfagas: Comprende todo el proceso de creación de las ráfagas a partir de las divisiones hechas del mensaje codificado.
4. Modulación: En el desarrollo de esta parte se han implementado los .vi dedicados a la modulación de las ráfagas.
5. Construcción de las tramas: Recoge los distintos bloques que incluyen las ráfagas en slots y los unen para crear las tramas.
6. Transmisión de tramas: En esta parte de la solución se realiza el envío de las tramas usando los bloques funcionales nativos que permiten la interacción con los USRP.
7. Demodulación: En esta parte se ha implementado el software que permite demodular la forma de onda recibida por el transceptor para obtener un array de bits con los datos correspondientes.
8. Recepción de tramas: Contiene el software que permite recibir las tramas enviadas usando los bloques funcionales nativos que permiten la interacción con los USRP.
9. Decodificación del canal: Para obtener el mensaje enviado en el receptor el último paso es la decodificación del canal en el que se transmite el mensaje.
10. Integración: La última parte del proceso de diseño supone la implementación de los bloques que corresponden a la MS y a la BS.

6.2.1 Creación de los mensajes

A continuación se describirán los .vi creados para la construcción de los mensajes, así como los mensajes implicados en el proceso.

6.2.1.1 Mensajes

Se describirán a continuación los mensajes implicados en el servicio de SMS ya que el resto de mensajes transmitidos han sido ya explicados en los proyectos correspondientes.

6.2.1.1.1 Mensajes estación móvil

6.2.1.1.1.1 SABM (CM-SERV-REQ)

Este mensaje se usa para configurar el canal SDCCH en el modo de operación “Multiple Frame Acknowledged”. Mediante la transmisión y recepción de este mensaje se establece un enlace de la capa de datos con la capa de red a través de un SAP (Punto de acceso de servicio), identificado por un SAPI.

En este caso, dentro del mensaje SABM lleva como elemento de información un mensaje CM-SERV-REQ. Este mensaje se usa para realizar una petición a la subcapa de gestión de las conexiones (CM-Sublayer), con el fin de habilitar la transferencia de mensajes cortos.

La estructura del mensaje SABM es la siguiente:

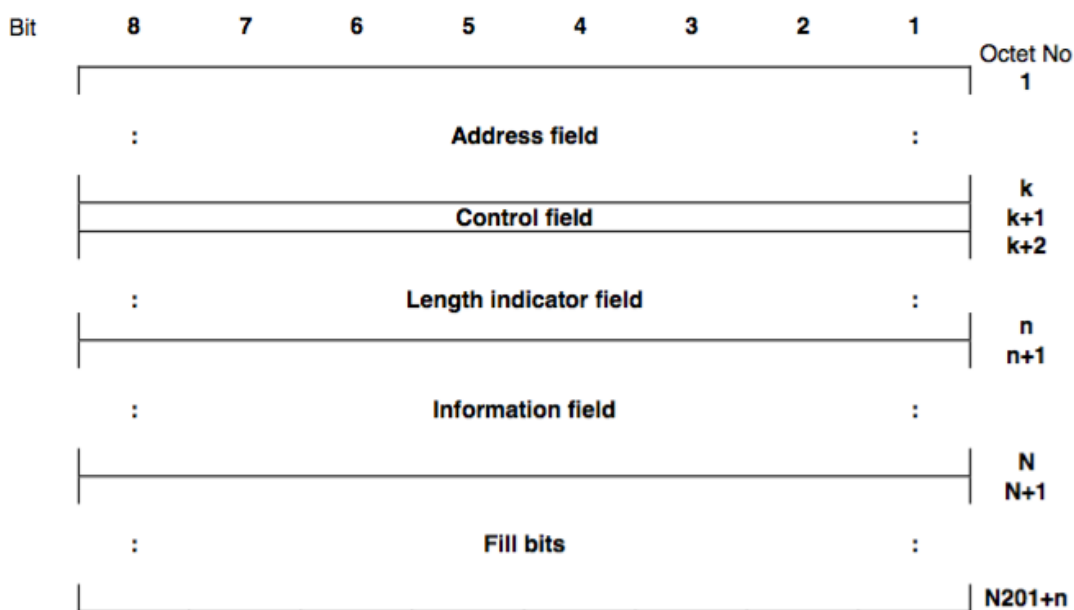


Figura 25: Formato SABM (CM-SERV-REQ) [26]

El campo “Address field” identifica el SAP para el que está destinado el SABM. Tiene el siguiente formato:

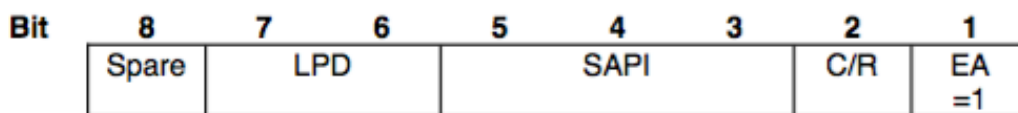


Figura 26: Formato Address Field [21]

Campo	Descripción	Valor
Spare	Este bit está incluido para problemas de compatibilidad futuros. Las tramas recibidas con un bit spare distinto de 0 serán ignoradas.	0
LPD	Identifica el protocolo de la capa de enlace de datos.	00
SAPI	Punto de acceso del servicio.	000
C/R	Este bit sirve para identificar la trama enviada como comando o como respuesta.	0
EA	Se usa para indicar el octeto final del "Address field".	1

Tabla 5: Campos Address Field

El campo "Control field" identifica el tipo de trama. Para el mensaje SABM toma el valor de "001P1111". El bit "P" en las tramas de comandos se usa para solicitar una respuesta para este mensaje. En este caso el comando SABM debe ser asentido por la BS para confirmar su recepción por lo tanto tomará el valor de "1".

El siguiente campo, "Length indicator field", contiene la longitud en octetos del elemento de información que contiene el mensaje, y tiene el siguiente formato:

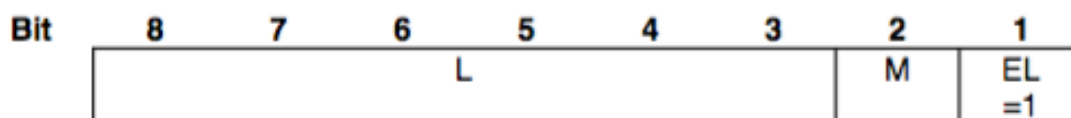


Figura 27: Formato "Length Indicator Field" [26]

Campo	Descripción	Valor
L	Contiene la longitud en octetos del campo "Information field".	Longitud CM-Serv- Req.
M	Se usa para indicar que los mensajes de la capa de red incluidos en el campo de información se encuentran segmentados.	0

EL	Se usa para indicar el último octeto del campo "Length indicator field".	1
----	--	---

Tabla 6: Campos "Length Indicator Field"

El campo "Information field" contiene el elemento de información del comando, que en este caso es el mensaje CM-Serv-Req.

El campo "Fill bits" está formado por una serie de bits de relleno puestos a 0. El número de bits de relleno viene dado por el parámetro N201. Este parámetro indica el número de octetos que tiene que tener la trama, y depende principalmente del formato de la trama y del canal por la que es transmitido. Para el formato de trama descrito para el SABM anteriormente, y teniendo en cuenta que se transmitirá por SDCCH, el valor del N201 es 20. A partir de esto y restándole los octetos que ocupe el campo de información, se obtiene el número de octetos que hay que rellenar con bits de relleno.

- CM-Serv-Req

La estructura del mensaje es la siguiente:

Campo	Descripción	Valor
Protocol Discriminator	Identifica el protocolo de la capa de red.	0101
Skip Indicator	Los mensajes recibidos con este campo distinto de "0000" deben ser ignorados.	0000
Message Type	Indica el tipo de mensaje relativo a los tipos de mensajes de la capa de red.	00100100
CM Service Type	Se utiliza para identificar el servicio al que hace referencia la petición.	0100
Ciphering Key Sequence Number	El propósito de este campo es hacerle posible a la red la identificación de la clave de cifrado.	0000
Mobile Station Classmark	Proporciona a la red información acerca de la prioridad del equipo de la estación móvil.	
Mobile Identity	Se usa para indicar a la red el IMSI del abonado móvil que va a usar los servicios de la red.	

Tabla 7: Campos CM-SERV-REQ

El formato del campo "Mobile station classmark" es el siguiente:

8	7	6	5	4	3	2	1	
Mobile station classmark 2 IEI								octet 1
Length of mobile station classmark 2 contents								octet 2
0 spare	Revision level		ES IND	A5/1	RF power capability			octet 3
0 spare	PS capa.	SS Screen. Indicator		SM ca pabi.	VBS	VGCS	FC	octet 4
CM3	0 spare	LCSVA CAP	UCS2	SoLSA	CMSP	A5/3	A5/2	octet 5

Figura 28: Formato "Mobile Station Classmark" [28]

Rellenando todos los parámetros mostrados en la figura anterior los 5 octetos correspondientes al campo quedan de la siguiente forma:

00000011							
0	01		0	0	000		
0	0	00		0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0

Tabla 8: Valores "Mobile Station Classmark"

El formato del campo "Mobile Identity" es el siguiente:

8	7	6	5	4	3	2	1	
		Mobile Identity IEI						octet 1
Length of mobile identity contents								octet 2
Identity digit 1				odd/ even indic	Type of identity			octet 3
Identity digit p+1				Identity digit p				octet 4*

Figura 29: Formato "Mobile Identity" [28]

El parámetro "Type of identity" identifica el número identificador que contendrá el campo, en este caso será el IMSI, por lo que este parámetro tomará el valor de "001". El bit "odd/even indicator", determina si el número de dígitos del identificador que se manda es par ("0"), o por el contrario es impar ("1"). El resto de parámetros ("Number digit 1", "Number digit 2"...), son los dígitos del número identificativo escogido codificados en 4 bits y ordenados de la manera indicada en la figura. En el caso de no completar un número de octetos entero se rellenarán los restantes con bits puestos a "1".

6.2.1.1.1.2 SABM (SAPI=3)

Este mensaje se usa para indicarle a la red el punto de acceso de servicio que se va a usar. En este caso en concreto se le indica a la red que se va a usar el servicio de SMS.

La estructura del mensaje es la siguiente:

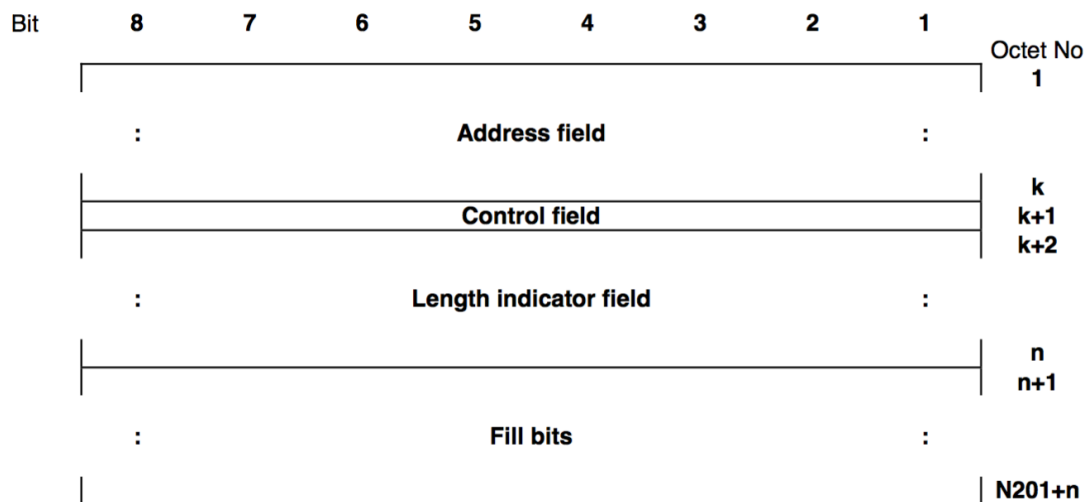


Figura 30: Formato SABM (SAPI=3) [26]

La descripción de los campos es la misma que en el caso del mensaje SABM (CM-Serv-Req) pero con algunas excepciones.

El valor del parámetro SAPI del campo “Address field” es “**011**”, ya que en este caso se indica que se va a usar el servicio de SMS.

El valor del parámetro L del campo “Length indicator field” es “**000000**” debido a que en este mensaje no se incluye campo “Information field”.

6.2.1.1.1.3 DISC (SAPI=0)

Este mensaje contiene el comando DISC que indica a la red que termine el modo de operación “Multiple Frame Acknowledged”.

La estructura del mensaje es la siguiente:

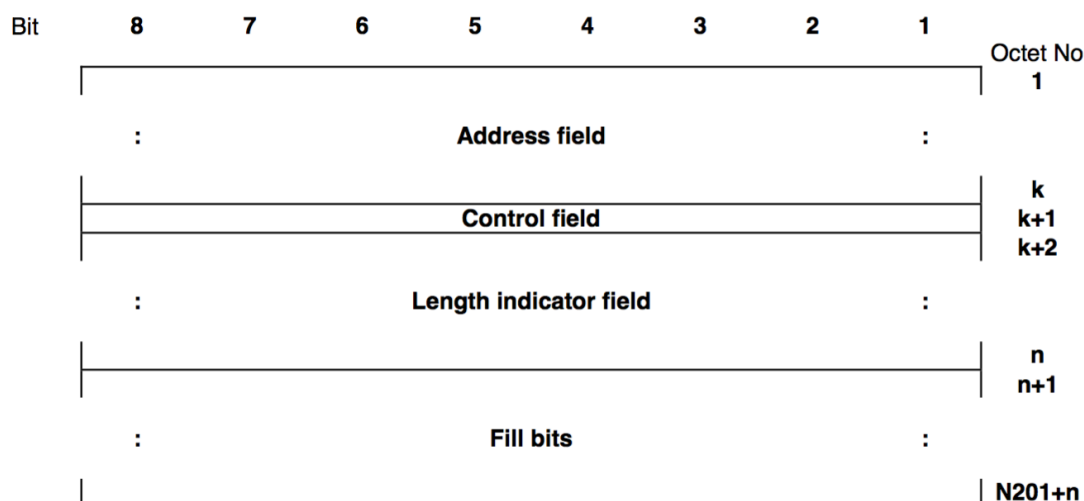


Figura 31: Formato DISC (SAPI=0) [26]

La descripción de los campos es la misma que en el caso del mensaje SABM (SAPI=3) pero con algunas excepciones.

El valor del parámetro SAPI del campo "Address field" es "000", ya que en este caso se indica que se termina el modo de operación para todos los servicios.

El valor del campo "Control field" es "010P0011" con el bit P con valor "1" para solicitar el asentimiento de la recepción del mensaje por parte de la red.

6.2.1.1.1.4 CP-DATA

Este mensaje contiene los datos de usuario que van a ser transmitidos entre los usuarios de la capa de gestión de las conexiones (CM-Sublayer). En el caso de este proyecto contiene el mensaje de la capa de transmisión de mensajes cortos (SM-RL).

La estructura del mensaje es la siguiente:

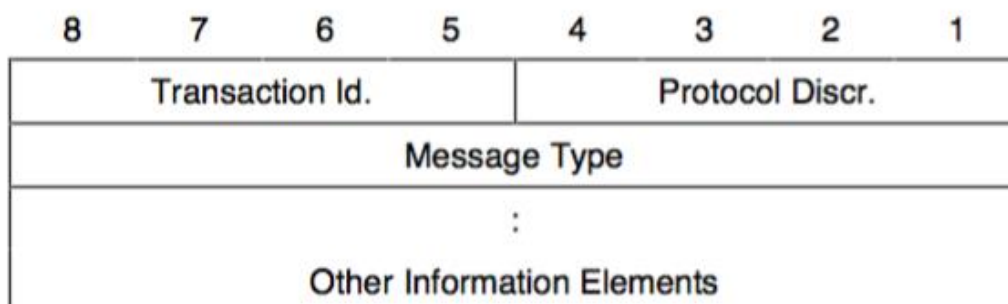


Figura 32: Formato CP-DATA [36]

Además de los campos mostrados en la figura anterior, el mensaje CP-DATA, contiene, como elemento de información, el campo CP-User data.

Campo	Descripción	Valor
Transaction Identifier	Identifica la transacción en la que se transmite el mensaje. Una transacción es un flujo de datos completo, en este caso el mensaje origen y la respuesta al mismo.	
Protocol Discriminator	Identifica el protocolo de la capa L3.	1001
Message Type	Junto con el "Protocol Discriminator" identifica la función del mensaje.	00000001
CP-User data	Este elemento contiene el mensaje de la capa SM-RL.	

Tabla 9: Campos CP-DATA

El formato del campo "Transaction Identifier" es el siguiente:

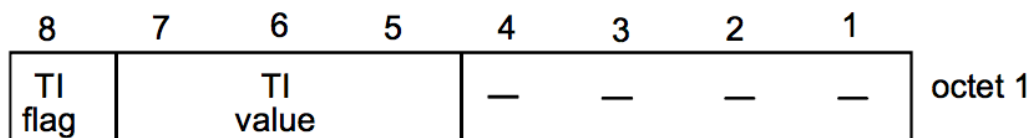


Figura 33: Formato "Transaction Identifier" [36]

El primer bit, "TI flag", indica si el mensaje que lo contiene es el que origina la transacción o por el contrario es la respuesta al mismo. En este caso el mensaje es el origen de la transacción por lo tanto tomará el valor "0". El parámetro "TI value" contendrá el propio identificador de la transacción.

Por otro lado, el campo CP-User data presenta el siguiente formato:

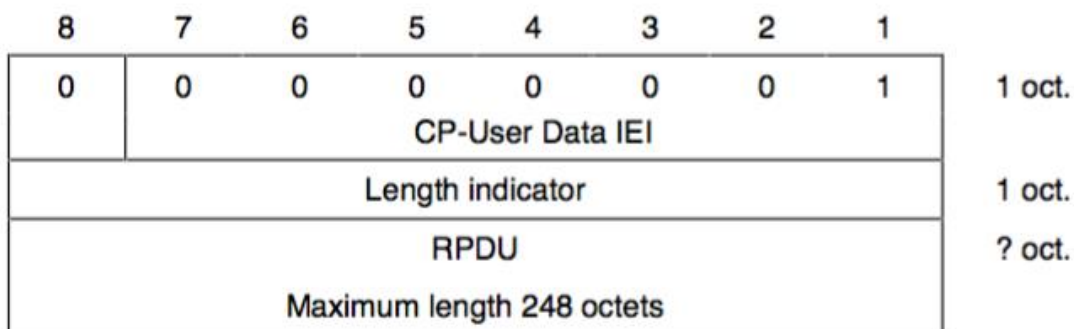


Figura 34: Formato "CP-User Data" [36]

Campo	Descripción	Valor
IEI	Es el identificador del elemento de información.	0000001
Length indicator	Contiene la longitud del RPDU en octetos.	Octetos RPDU.
RPDU	Son los datos de la capa de transmisión de mensajes cortos.	

Tabla 10: Campos "CP-User Data"

- RP-DATA

Este mensaje se usa para transmitir los datos de la capa de transferencia de mensajes cortos (SM-TL).

El formato general de los mensajes de la capa SM-RL es el siguiente:

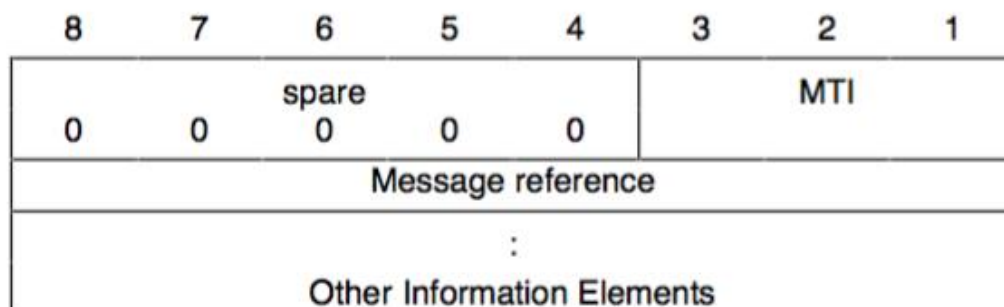


Figura 35: Formato RP-DATA [36]

Además de los campos mostrados en la figura anterior, como elementos de información, el mensaje RP-DATA contiene los campos "Originator Address", "Destination Address" y "User Data".

Campo	Descripción	Valor
Spare	Los mensajes que en este campo tengan un valor distinto de "00000", serán descartados.	00000
MTI	Identifica el tipo de mensaje de la capa de transmisión de mensajes cortos.	000
Message Reference	Se usa para asociar el mensaje RP-DATA con su correspondiente asentimiento (RP-ACK).	Referencia del mensaje.
Originator Address	En el caso de mensajes terminados en la estación móvil contiene la dirección del centro de servicios (SCA) origen. En el caso de mensajes originados en la MS el valor es 0.	00000000

Destination Address	En el caso de mensajes originados en la estación móvil contiene la SCA destino. En otro caso, el valor es 0.	
RP-User data	Contiene los datos de la capa de transferencia de mensajes cortos que llevan el SMS.	

Tabla 11: Campos RP-DATA

El formato del campo "Destination Address" es el siguiente:

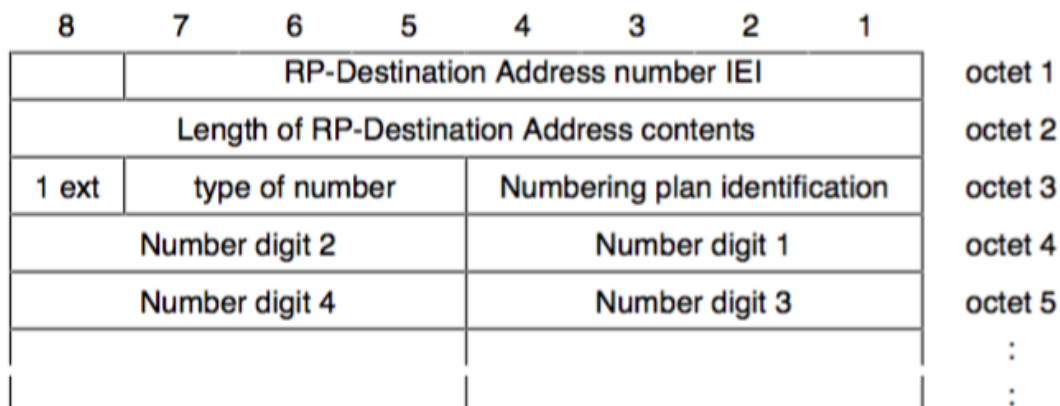


Figura 36: Formato "Destination Address" [36]

Campo	Descripción	Valor
IEI	Es el identificador del elemento de información.	00011100
Length	Contiene la longitud en octetos del resto del mensaje.	Octetos resto mensaje.
Type of number	Contiene el tipo de número identificativo del destino.	010
Numbering plan identification	Identifica el plan de numeración usado para el tipo de número especificado en el campo anterior.	0001

Tabla 12: Campos "Destination Address"

El resto de campos ("Number digit 1", "Number digit 2"...), son los dígitos del número identificativo del destino codificados en 4 bits y ordenados como se muestra en la figura. Si el número de dígitos es impar, para completar un número de octetos enteros, los 4 bits restantes se codifican como "1111".

Por último, el campo RP-User data presenta la siguiente estructura:

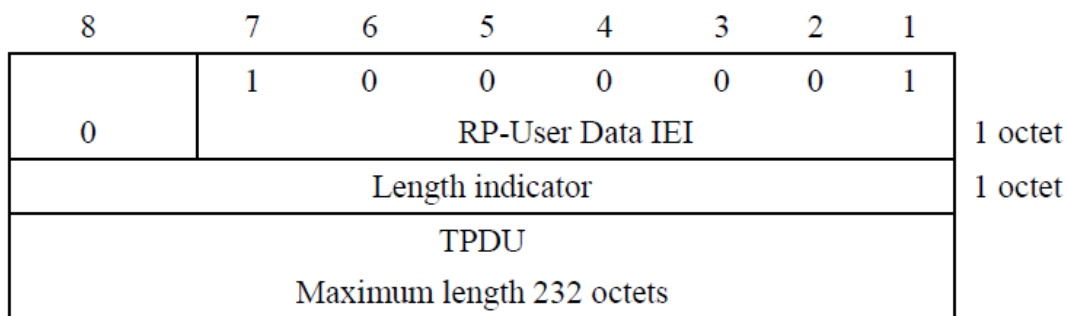


Figura 37: Formato "RP-User Data" [36]

Campo	Descripción	Valor
IEI	Es el identificador del elemento de información.	1000001
Length indicator	Contiene la longitud del TPDU en octetos.	Octetos TPDU.
TPDU	Son los datos de la capa de transferencia de mensajes cortos.	

Tabla 13: Campos "RP-User Data"

- SMS-SUBMIT

Es el mensaje de la capa SM-TL que contiene el texto codificado del SMS, el número codificado del destinatario y demás elementos de información relacionados. El mensaje presenta la siguiente estructura:

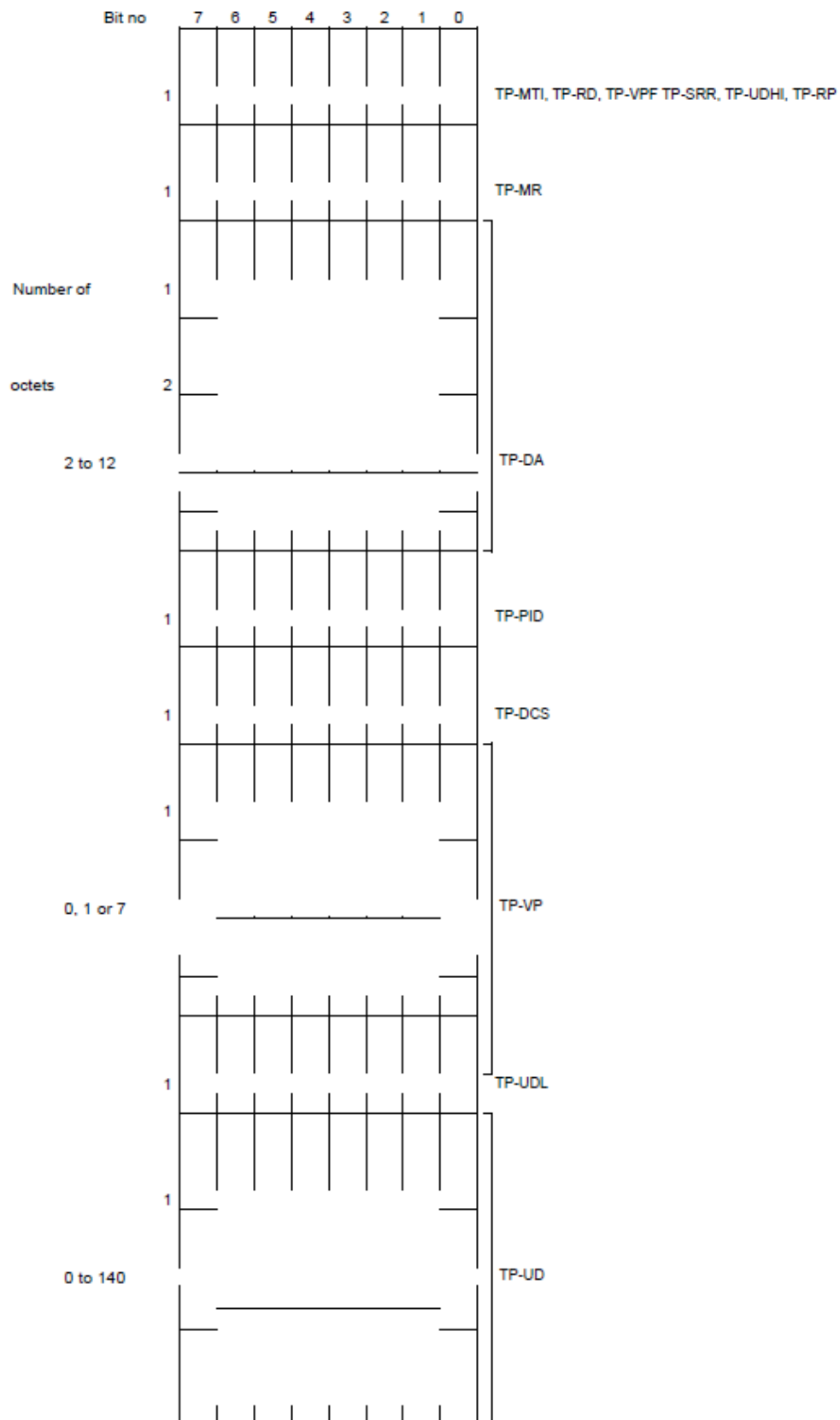


Figura 38: Formato "SMS-SUBMIT" [34]

A continuación se describirán los campos incluidos en el mensaje construido para el trabajo, ya que algunos campos opcionales no se han incluido:

Campo	Descripción	Valor
TP-MTI	Indica el tipo de mensaje de la capa SM-TL.	01
TP-RD	Indica si al recibir mensajes que contienen la misma referencia de mensaje y dirección de destino que cualquiera que se encuentre en el centro de servicios, han de ser descartados o no.	1
TP-VPF	Indica si el mensaje contiene el campo TP-VP (período de validez), y, en caso afirmativo, el formato del mismo.	00
TP-SRR	Este campo sirve para solicitar un reporte del estado del mensaje.	0
TP-UDHI	Indica si el campo TP-UD lleva cabecera.	0
TP-RP	Indica si se ha configurado un camino de respuesta (Reply Path) para esta transacción.	0
TP-MR	Proporciona un número de referencia para relacionarlo con el asentimiento del propio mensaje.	Referencia del mensaje.
TP-DA	Este campo contiene la dirección del destinatario del SMS.	
TP-PID	Identifica el protocolo de transmisión del mensaje.	00111111
TP-DCS	Este campo indica el esquema de codificación de los caracteres de texto del SMS y puede indicar también la clase del mensaje.	11110000
TP-UDL	Determina el número de caracteres del texto del SMS.	Caracteres SMS.
TP-UD	Este campo contiene el texto del SMS codificado según el esquema de codificación especificado en el campo TP-DCS.	

Tabla 14: Campos SMS-SUBMIT

El formato del campo TP-DA es el siguiente:

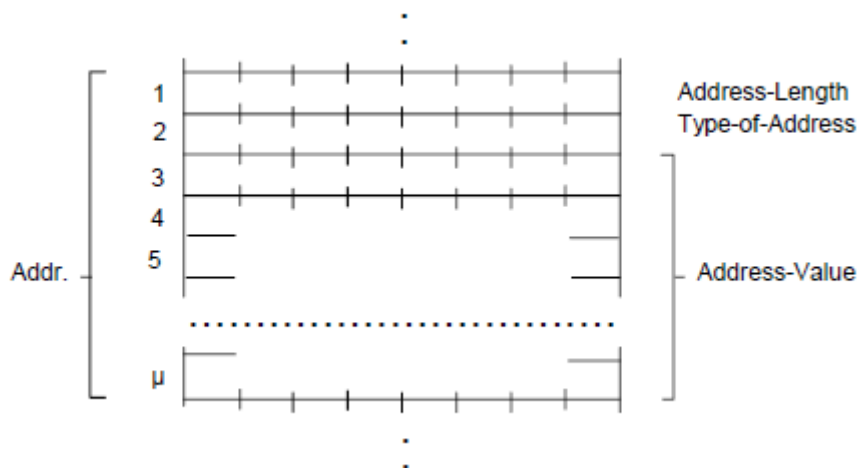


Figura 39: Formato "TP-DA" [34]

El campo "Address-Length" indica la longitud en octetos del resto del mensaje.

El campo "Type-of-Address" sigue la siguiente estructura:

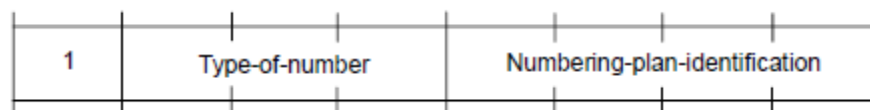


Figura 40: Formato "Type-of-Address" [34]

El parámetro "Type-of number" tomará el valor de "010", que se corresponde con el tipo de número nacional. El parámetro "Numbering-plan-identification" tomará el valor de "0001", que indica que el plan de numeración usado es "ISDN/telephone numbering plan (E.164/E.163)".

El campo "Address-Value", contiene los dígitos del número del destinatario representados en forma de semioctetos. Esta representación codifica cada dígito del número en 4 bits siguiendo el siguiente orden:

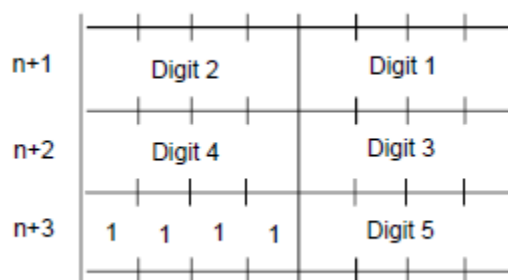


Figura 41: Formato "Address Value" [34]

Por último, cabe mencionar la codificación de los caracteres de texto del SMS usados en el proyecto. Se ha decidido emplear el esquema de codificación por defecto del servicio de SMS. Este esquema codifica cada carácter en 7 bits siguiendo la siguiente tabla para determinar los bits que corresponden a cada carácter:

					b7	0	0	0	0	1	1	1	1
					b6	0	0	1	1	0	0	1	1
					b5	0	1	0	1	0	1	0	1
b4	b3	b2	b1			0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0		è	Δ	SP	0	I	P	í	p
0	0	0	1	1		é	1)	!	1	A	Q	a	q
0	0	1	0	2		§	Φ	"	2	B	R	b	r
0	0	1	1	3		¥	Γ	#	3	C	S	c	s
0	1	0	0	4		è	Λ	□	4	D	T	d	t
0	1	0	1	5		é	Ω	%	5	E	U	e	u
0	1	1	0	6		ù	Π	&	6	F	V	f	v
0	1	1	1	7		ì	Ψ	'	7	G	W	g	w
1	0	0	0	8		ò	Σ	(8	H	X	h	x
1	0	0	1	9		ç	Θ)	9	I	Y	i	y
1	0	1	0	10		LF	Ξ	*	:	J	Z	j	z
1	0	1	1	11		ø	1)	+	;	K	Ä	k	ä
1	1	0	0	12		ø	Æ	,	<	L	Ö	l	ö
1	1	0	1	13		CR	æ	-	=	M	Ñ	m	ñ
1	1	1	0	14		Å	ß	.	>	N	Ü	n	ü
1	1	1	1	15		å	É	/	?	O	Ş	o	à

Figura 42: Codificación caracteres [33]

6.2.1.1.1.5 CP-ACK

Se usa para asentar la recepción un mensaje CP-DATA.

La estructura del mensaje es la misma que la descrita en el caso del CP-DATA pero sin ningún elemento de información. El valor de los campos es el mismo también, a excepción del campo "Message Type", que, en este caso, tomará el valor de "00000100". Por otra parte, el valor del bit "TI-Flag" en este caso será de "1", ya que este mensaje es la respuesta al mensaje que origina la transacción.

6.2.1.1.2 Mensajes estación base

6.2.1.1.2.1 UA

Este mensaje es transmitido por la estación base para indicar la recepción y la aceptación de los comandos relacionados con los modos de operación (SABM o DISC). El modo de actuación se activa una vez recibido el UA por parte de la estación móvil.

En el caso de este proyecto la BS transmite tres UA distintos dependiendo del comando recibido.

En el caso de los UA que se transmiten como respuesta al SABM (SAPI=3) y al DISC, el formato es el mismo, cambiando únicamente el valor del SAPI:

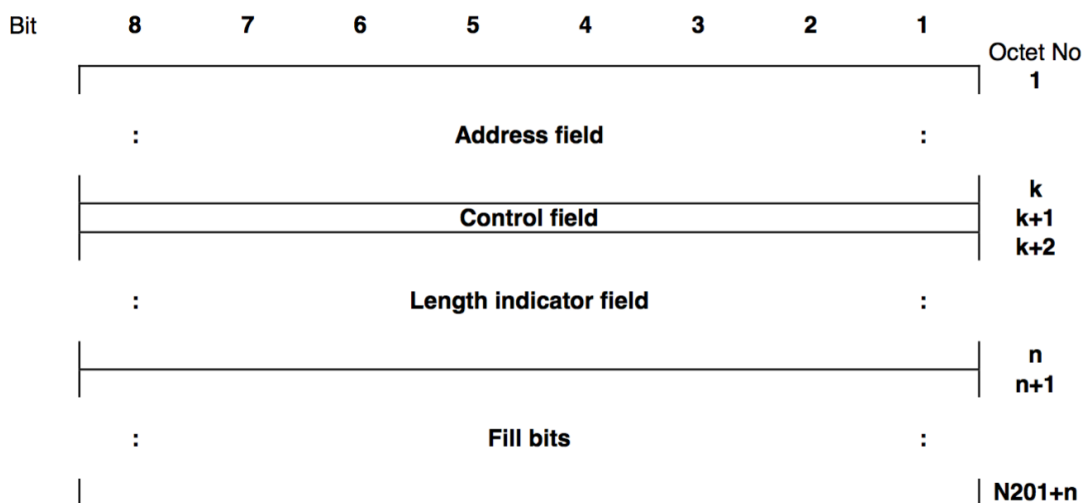


Figura 43: Formato UA [26]

La descripción y composición de los campos es la misma que la mostrada para el mensaje SABM (CM-Serv-Req).

Para el UA (SAPI=3), el valor del campo "Address field" es "00001101", mientras que para el mensaje UA (SAPI=0), el valor de dicho campo es "00000001".

En ambos casos el valor del campo "Control field" es "011F0011". El bit F en las tramas de respuesta se usa para indicar que dicha trama es una respuesta a un comando que previamente la ha solicitado incluyendo el bit P de su campo "Control field" a 1. Por lo tanto en ambos mensajes tomará el valor "1".

En el caso del UA que se transmite como respuesta al mensaje SABM (CM-Serv-Req), el formato será el siguiente:

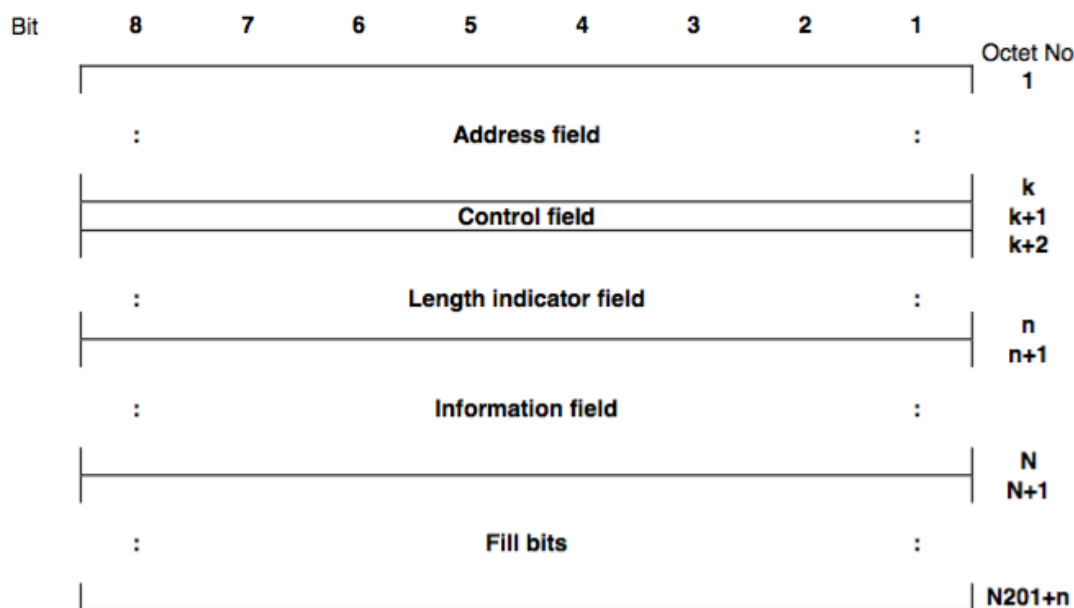


Figura 44: Formato UA (CM-SERV-REQ) [26]

En este caso el valor del campo “Address field” será de nuevo “00000001”. El campo “Control field” tomará el mismo valor.

Por otro lado como elemento de información este mensaje contendrá el mismo que el mensaje SABM (CM-Serv-Req), cambiando por lo tanto el campo “Length indicator field” por el número de octetos del elemento.

6.2.1.1.2.2 CP-DATA

En el caso del CP-DATA enviado desde la estación base, el mensaje contendrá el asentimiento de los mensajes de las capas de transmisión y transferencia del CP-DATA previamente enviado por la MS que contenía el SMS.

La estructura de este mensaje y el valor de los campos son los mismos que el mensaje CP-DATA descrito en los mensajes de la estación móvil.

Por otra parte, el mensaje de la capa de transmisión que contendrá el campo CP-User data en este caso será el RP-ACK.

- RP-ACK

Este mensaje se envía como asentimiento al RP-DATA recibido previamente.

Su estructura general es la misma que la del mensaje RP-DATA descrito en los mensajes de la estación móvil, pero, con dos excepciones. Por un lado el valor del campo MTI en este caso será “011”. Por otro lado, en este caso, como elementos de información el mensaje sólo contendrá el elemento RP-User Data, que contendrá el asentimiento del mensaje SMS-SUBMIT recibido previamente.

- SMS-SUBMIT-REPORT

Este mensaje es el asentimiento del SMS-SUBMIT recibido previamente que contenía el SMS.

La estructura del mensaje es la siguiente:

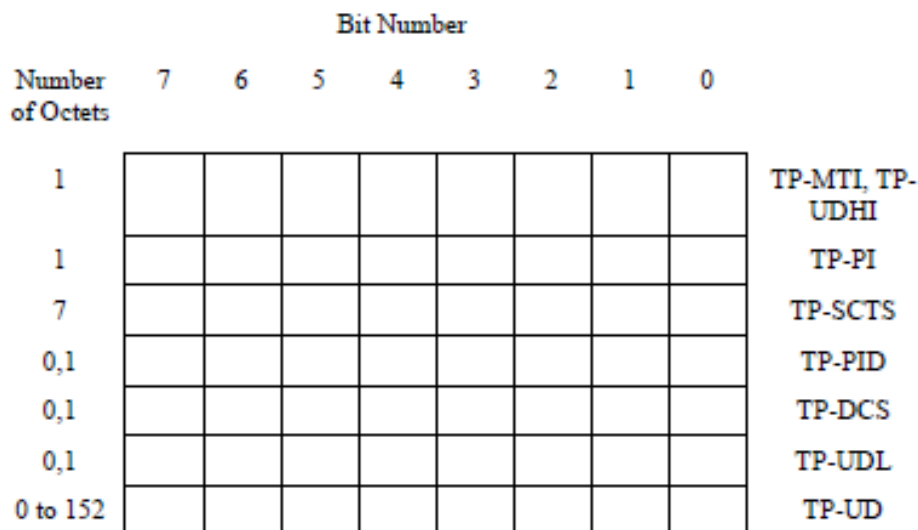


Figura 45: Formato SMS-SUBMIT-REPORT [34]

A continuación se describirán los campos incluidos en el mensaje construido para el trabajo, ya que algunos campos opcionales no se han incluido:

Campo	Descripción	Valor
TP-MTI	Indica el tipo de mensaje de la capa SM-TL.	01
TP-PI	Indica la presencia o ausencia de los parámetros opcionales del mensaje (TP-UDL, TP-DCS, TP-PID).	00000000
TP-SCTS	Representa la hora local a la que se ha generado el mensaje.	

Tabla 15: Campos SMS-SUBMIT-REPORT

El formato del campo TP-SCTS es el siguiente:

	Year:	Month:	Day:	Hour:	Minute:	Second:	Time Zone
Digits: (Semi-octets)	2	2	2	2	2	2	2

Figura 46: Formato "TP-SCTS" [34]

En la figura anterior se describe el orden y el número de semioctetos en el que se representan los datos que describen la hora. Cada dígito de cada parámetro se representa en un semiocteto.

6.2.1.1.2.3 CP-ACK

La descripción de este mensaje es la misma que la realizada para el mensaje CP-ACK de la MS.

6.2.1.2 Construcción de los mensajes

Para la construcción de los mensajes se han creado distintos bloques funcionales que simulan cada una de las capas del servicio de SMS.

Tanto la estación móvil, como la estación base tienen sus propias capas, que aunque tengan la misma denominación, son diferentes entre sí.

En el servicio de mensajes cortos se encuentran implicadas las siguientes capas: capa de aplicación (SM-AL), capa de transferencia (SM-TL), capa de transmisión (SM-RL), capa de gestión de las conexiones (CM-Sublayer), capa de gestión de la movilidad (MM-Sublayer) y capa de enlace de datos (DLL).

6.2.1.2.1 Estación móvil

6.2.1.2.1.1 DLL

Los mensajes SABM (CM-Serv Req), SABM (SAPI=3) y DISC (SAPI=0) se construyen mediante la capa DLL. Dentro del bloque DLL.vi que implementa esta capa se ha creado una estructura de casos para cada tipo de mensaje.

Los mensajes SABM presentan el siguiente diagrama de bloques:

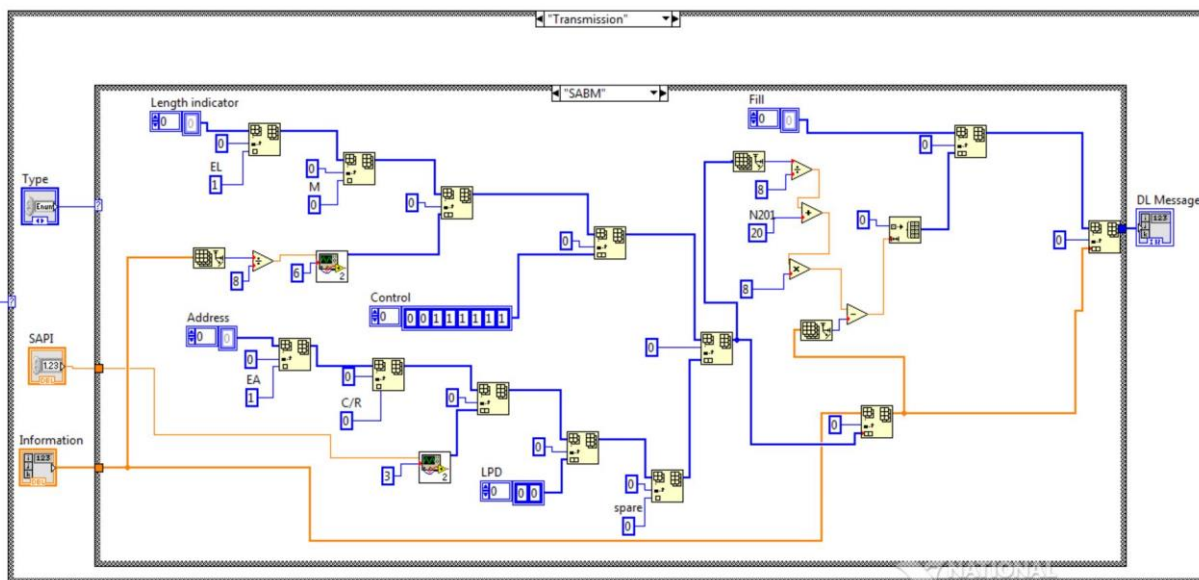


Figura 47: Diagrama de bloques "DLL.vi" (SABM) (MS)

Por otro lado, el diagrama de bloques que permite la creación del comando DISC es el siguiente:

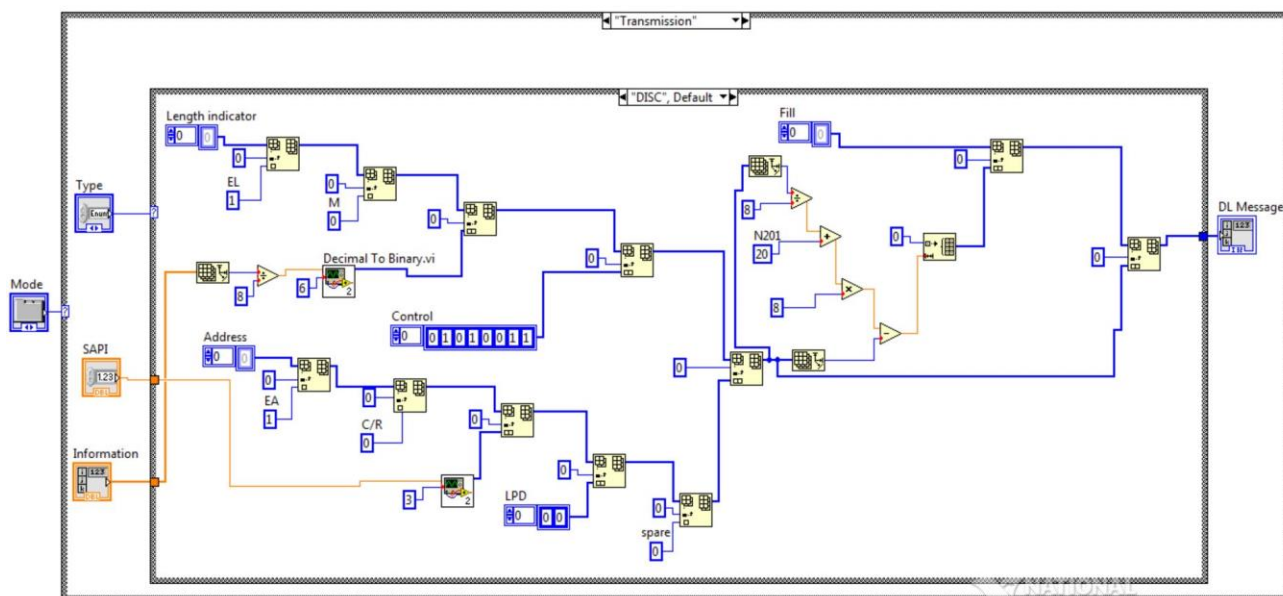


Figura 48: Diagrama de bloques “DLL.vi” (DISC) (MS)

El bloque DLL presenta las siguientes entradas:

- **Mode:** Permite usar la capa para la construcción de mensajes (Transmission) o para extraer los campos de un mensaje ya construido (Reception).
- **Type:** Permite seleccionar el comando que se desea construir (SABM o DISC).
- **SAPI:** Con ella indicamos el punto de acceso al servicio.
- **Information:** Permite pasar un mensaje de información en el caso de que se requiera.

La salida “DL Message” es el mensaje de la capa DLL ya construido.

Los campos del mensaje que no son variables se han introducido en el mensaje mediante constantes.

6.2.1.2.1.2 MM-Sublayer

Esta capa permite la construcción del mensaje CM-Serv-Req que posteriormente se pasará como elemento de información a la capa DLL descrita en el apartado anterior para formar el mensaje SABM (CM-Serv-Req).

Presenta el siguiente diagrama de bloques:

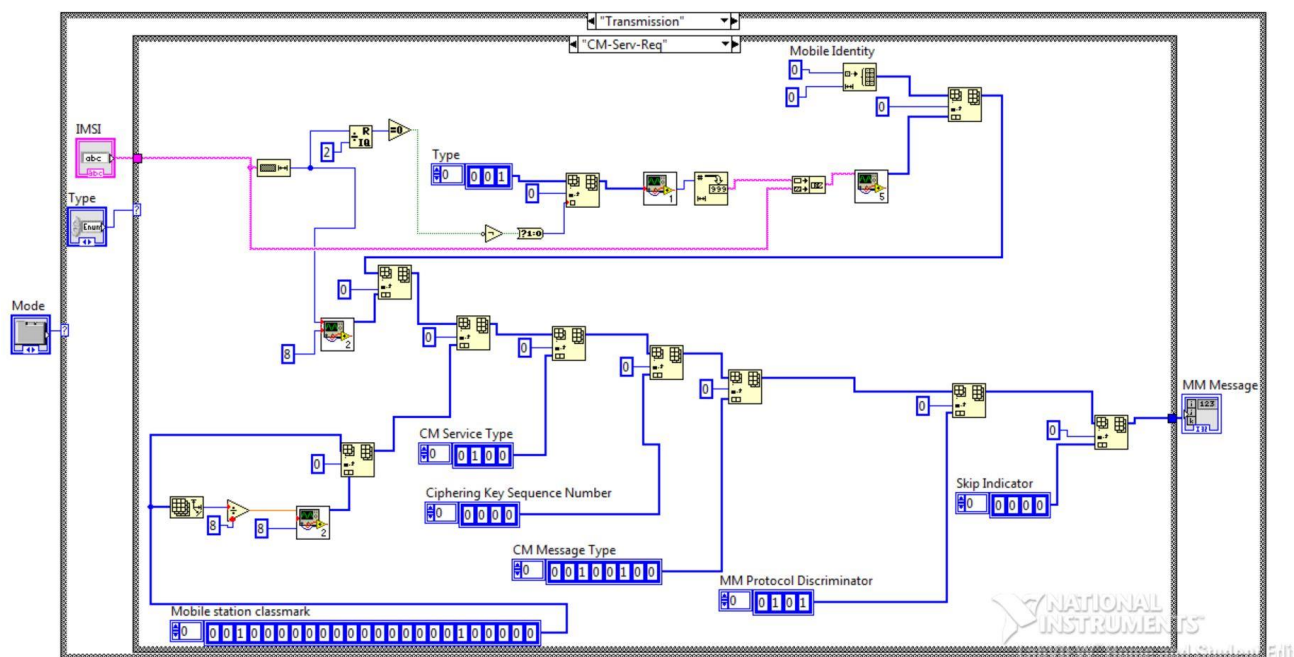


Figura 49: Diagrama de bloques “MM-Sublayer.vi” (MS)

De nuevo podemos escoger el modo “Transmission” o “Reception” según para que necesitamos la capa.

Las entradas del bloque son las siguientes:

- **IMSI:** A través de ella podemos introducir el número IMSI para incluirlo en el mensaje.
- **Type:** Sirve para seleccionar el tipo de mensaje que deseamos construir.

La salida “MM Message” contiene el mensaje de la capa ya construido.

6.2.1.2.1.3 SM-AL

Esta capa es la encargada de recoger los datos del usuario y los parámetros necesarios, y, de transferirlos a la capa de transferencia.

Su diagrama de bloques es el siguiente:

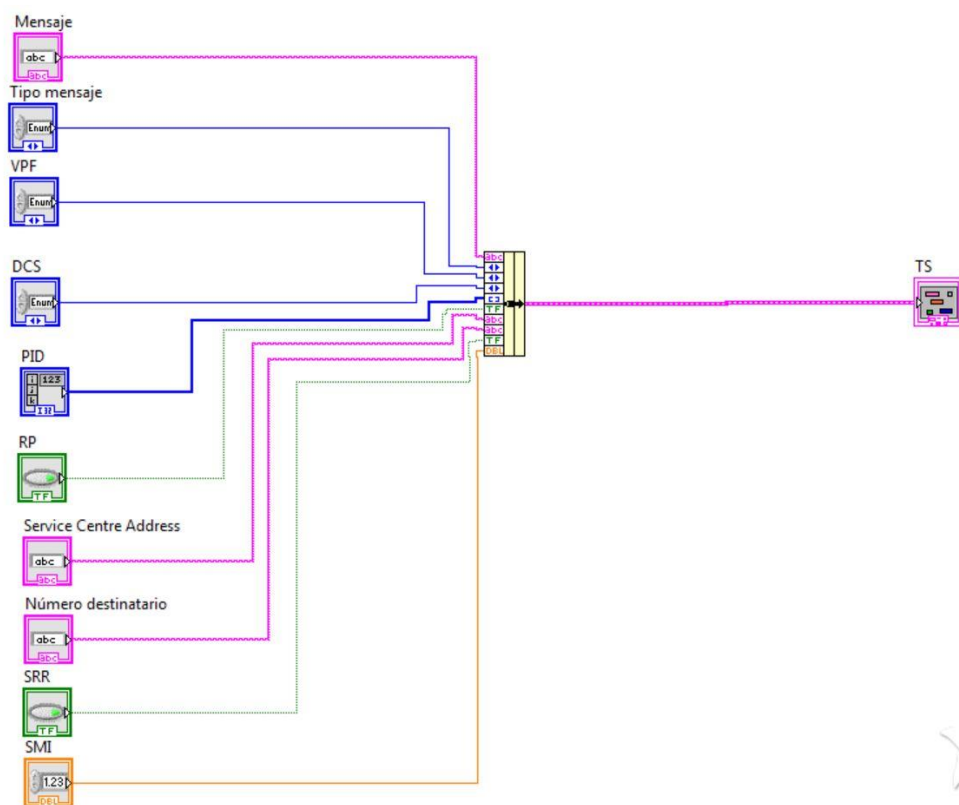


Figura 50: Diagrama de bloques “SM-AL.vi” (MS)

El bloque presenta las siguientes entradas:

- **Mensaje:** Contiene una cadena con el texto del SMS.
- **Tipo mensaje:** Permite seleccionar el tipo del mensaje de la capa de transferencia que se quiere mandar, en el caso de este proyecto SMS-SUBMIT o SMS-SUBMIT-REPORT.
- **VPF:** Posibilita la elección del formato del periodo de validez, y tiene las siguientes opciones: “YES-SOCT”, que indica que el mensaje incluirá el periodo de validez en formato semiocteto, “YES-INT”, que indica la presencia del campo período de validez en formato entero, y, “NO”, que indica que el mensaje que contiene el SMS no incluye período de validez. Para la realización del proyecto no se ha usado periodo de validez, por lo tanto se escogerá en cualquier caso la opción “NO”.
- **DCS:** Permite seleccionar el esquema de codificación de los caracteres del mensaje de texto. Se pueden seleccionar las siguientes opciones: “APL-DEF”, que indica que el esquema de codificación será el que se usa por defecto en el servicio de mensajes cortos, y, “APL-8”, que indica que los caracteres se codificarán en 8 bits. En la implementación del trabajo sólo se ha usado “APL-DEF”.
- **PID:** A través de esta entrada se especifica el identificador del protocolo usado.
- **RP:** Con este controlador se determina si se establece camino de respuesta para este mensaje.
- **Service Centre Address:** Permite especificar la dirección del centro de servicios asociado.
- **Número destinatario:** Recoge el número del usuario destino del SMS a enviar.

- **SRR:** Indica si se pide reporte de estado para el mensaje que se va a construir.
- **SMI:** Por esta entrada se introduce el identificador del mensaje.

Como única salida existe “TS”, que recoge todos los datos anteriormente descritos y los agrupa para transferirlos a la capa de transferencia.

6.2.1.2.1.4 SM-TL

Este bloque funcional construye los mensajes de la capa de transferencia a partir de los datos obtenidos de la capa SM-AL y, transfiere los datos necesarios a la capa de transmisión.

Presenta el siguiente diagrama de bloques:

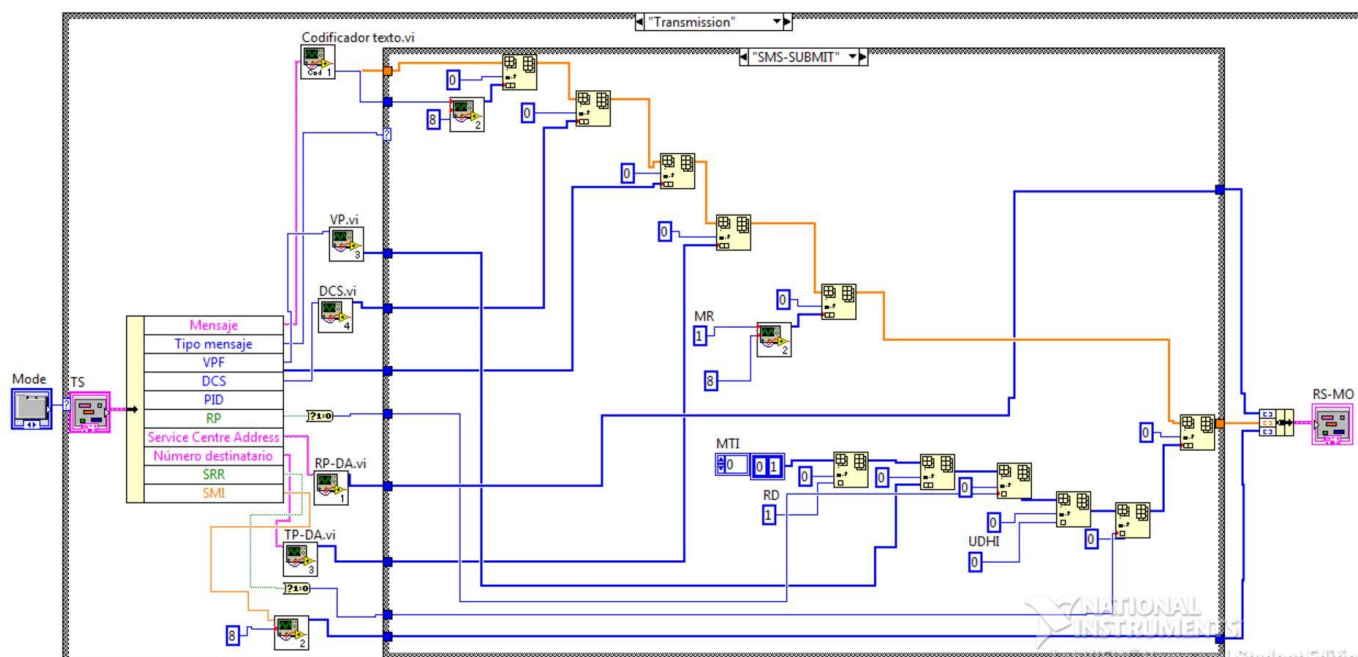


Figura 51: Diagrama de bloques “SM-TL.vi” (MS)

Las entradas del bloque son las siguientes:

- **Mode:** Permite indicar si la capa se va a usar para construir un mensaje o deconstruirlo.
- **TS:** Es la agrupación de los datos del usuario y los parámetros necesarios, proporcionada por la capa SM-AL.

La salida, “RS-MO”, es la agrupación de datos que necesita la siguiente capa, SM-RL, para poder construir su mensaje. Contiene la dirección del centro de servicios ya codificada, el mensaje de la capa de transferencia y el identificador del mensaje.

6.2.1.2.1.5 SM-RL

Este vi es el encargado de construir el mensaje de la capa de transmisión a partir de los datos obtenidos de la capa de transferencia.

El bloque funcional presenta el siguiente diagrama bloques:

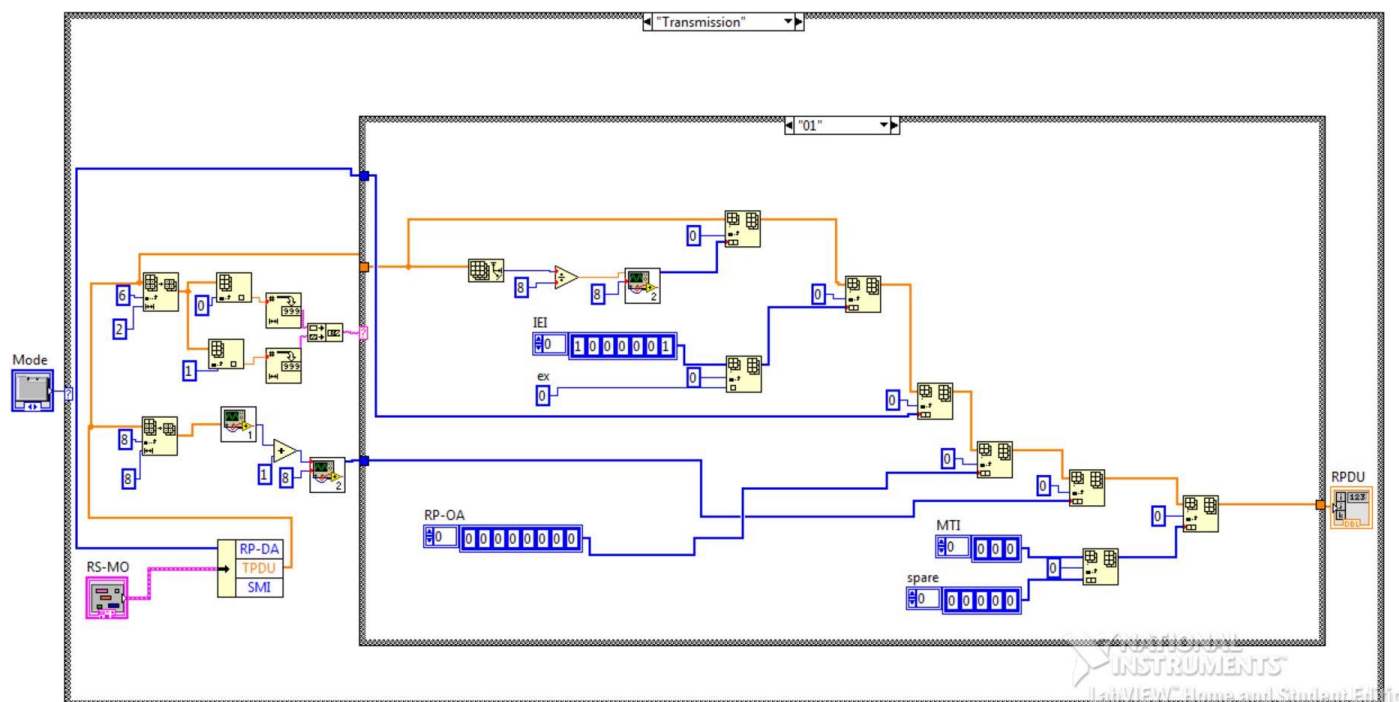


Figura 52: Diagrama de bloques “SM-RL.vi” (MS)

Una vez más se ha diseñado para poder elegir en primera instancia el modo de la capa con la entrada “Mode”.

La entrada “RS-MO” contiene los datos proveídos por la capa de transferencia, los cuales se usarán para construir el mensaje,

El tipo del mensaje de la capa de transmisión se obtiene del propio mensaje de la capa de transferencia, ya que a cada tipo de mensaje de la capa SM-TL, le corresponde uno de la capa de transmisión.

La salida “RPDU” proporciona a la siguiente capa (CM-Sublayer), el mensaje completo de la capa en la que nos encontramos.

6.2.1.2.1.6 CM-Sublayer

Este bloque funcional implementa la capa de gestión de las conexiones y es el encargado de crear los mensajes a partir de los datos obtenidos de la capa de transmisión. En el caso de este TFG se encarga de construir los mensajes “CP-DATA” Y “CP-ACK” de la estación móvil.

En el caso del mensaje “CP-DATA”, el vi presenta e siguiente diagrama de bloques:

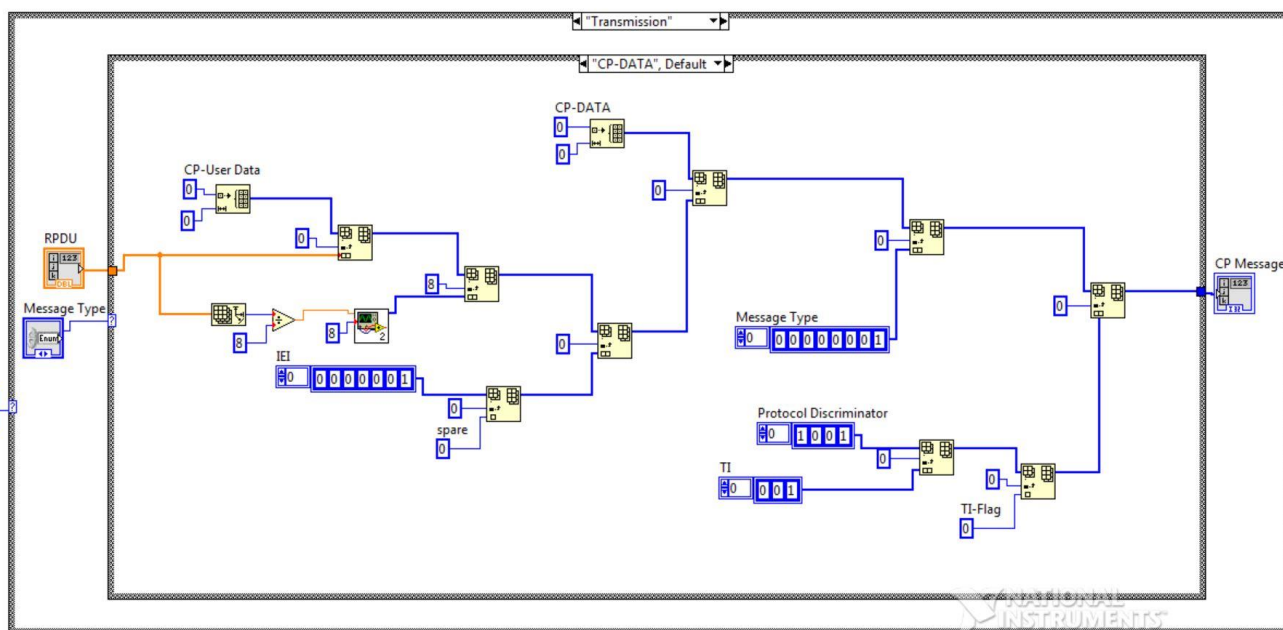


Figura 53: Diagrama de bloques "CM-Sublayer.vi" (CP-DATA) (MS)

Y, el mensaje "CP-ACK":

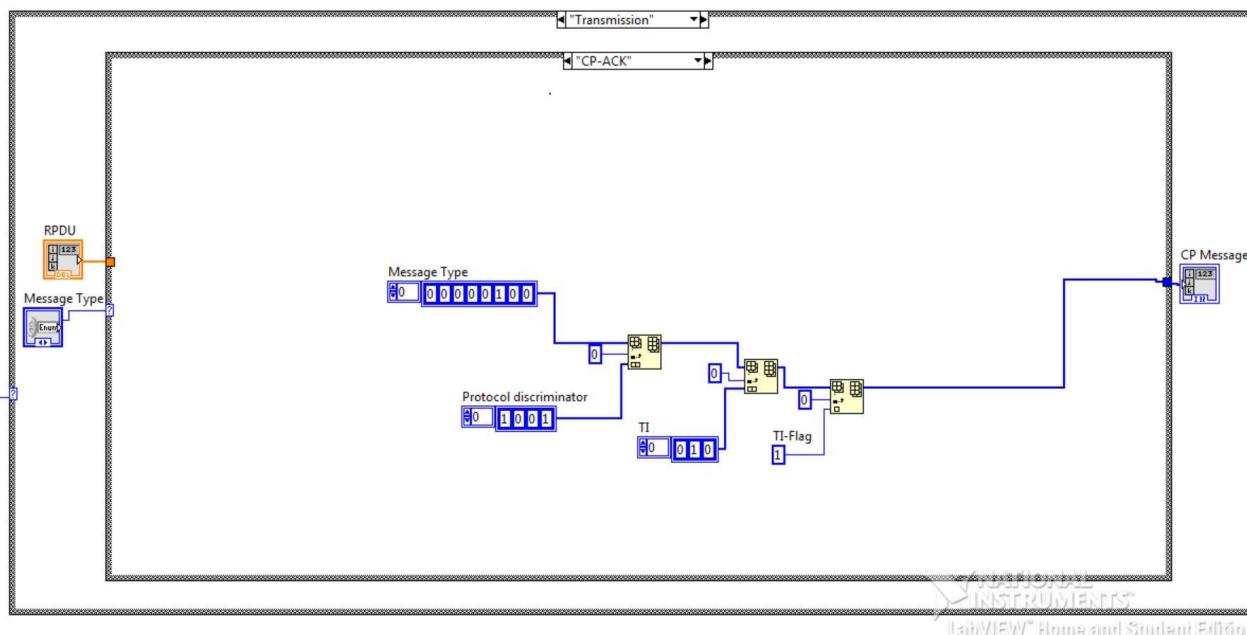


Figura 54: Diagrama de bloques "CM-Sublayer.vi" (CP-ACK) (MS)

El bloque presenta las siguientes entradas:

- **Mode:** Permite indicar el modo de la capa.
- **Message Type:** Permite seleccionar que tipo de mensaje queremos construir.
- **RPDU:** Por esta entrada se introducen los datos de la capa de transmisión que se incluirán en el mensaje construido.

La salida “CP Message”, es el mensaje de la capa CM-Sublayer completo.

6.2.1.2.2 Estación base

Para la implementación del proceso de transmisión de SMS, se ha simulado el centro de servicios encargado de recibir los mensajes relacionados con el servicio en la propia estación base, por tanto las llamadas a los bloques que implementan las capas involucradas se harán desde el vi que se corresponde con la BS.

6.2.1.2.2.1 DLL

Este bloque implementa la capa de enlace de datos del centro de servicios. Es el encargado de construir los mensajes UA de la BS.

Presenta el siguiente diagrama de bloques:

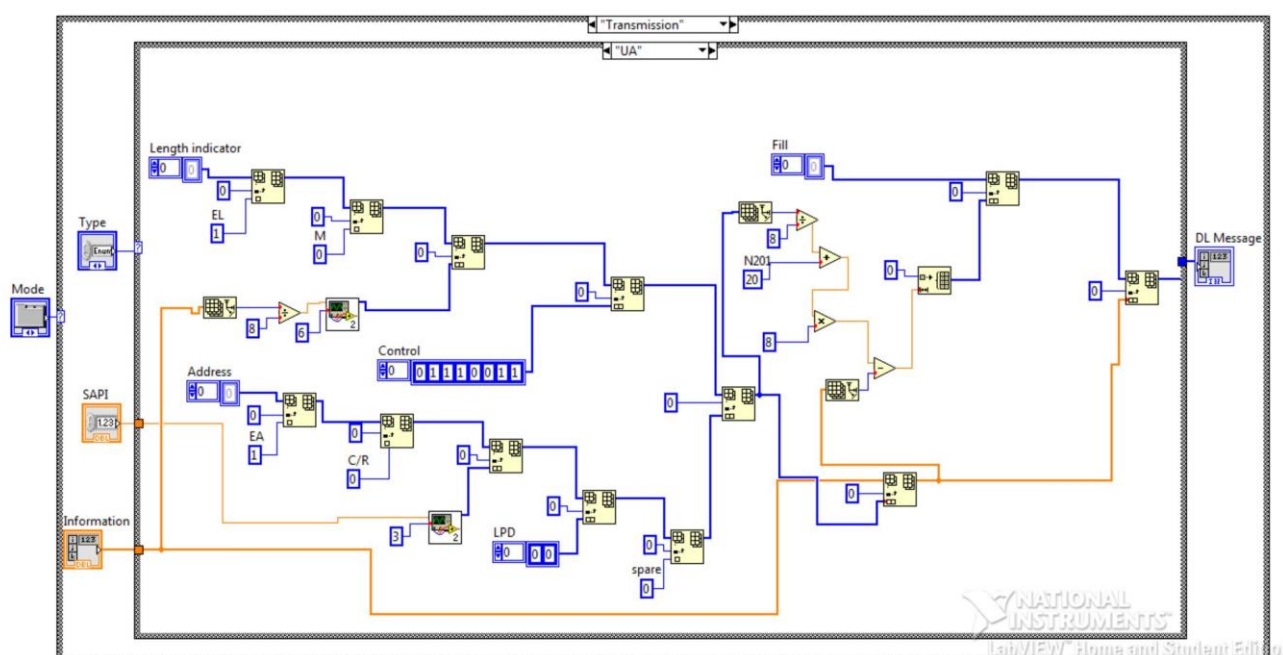


Figura 55: Diagrama de bloques “DLL.vi” (BS)

Como en todas las capas presenta una entrada para seleccionar el modo de la capa (Mode).

Además, presenta una entrada para seleccionar el tipo de mensaje a construir (Type), que en el caso de la BS será “UA”, una entrada para indicar el SAPI, y, una entrada para elementos de información (Information) en caso de que fuera necesario (UA (CM-Serv Req)).

La salida “DL Message” contiene el mensaje de la capa DLL completo.

6.2.1.2.2.2 SM-TL

Este bloque funcional implementa la capa de transferencia del centro de servicios y es el encargado de construir los mensajes de esta (SMS-SUBMIT-REPORT).

Presenta el siguiente diagrama de bloques:

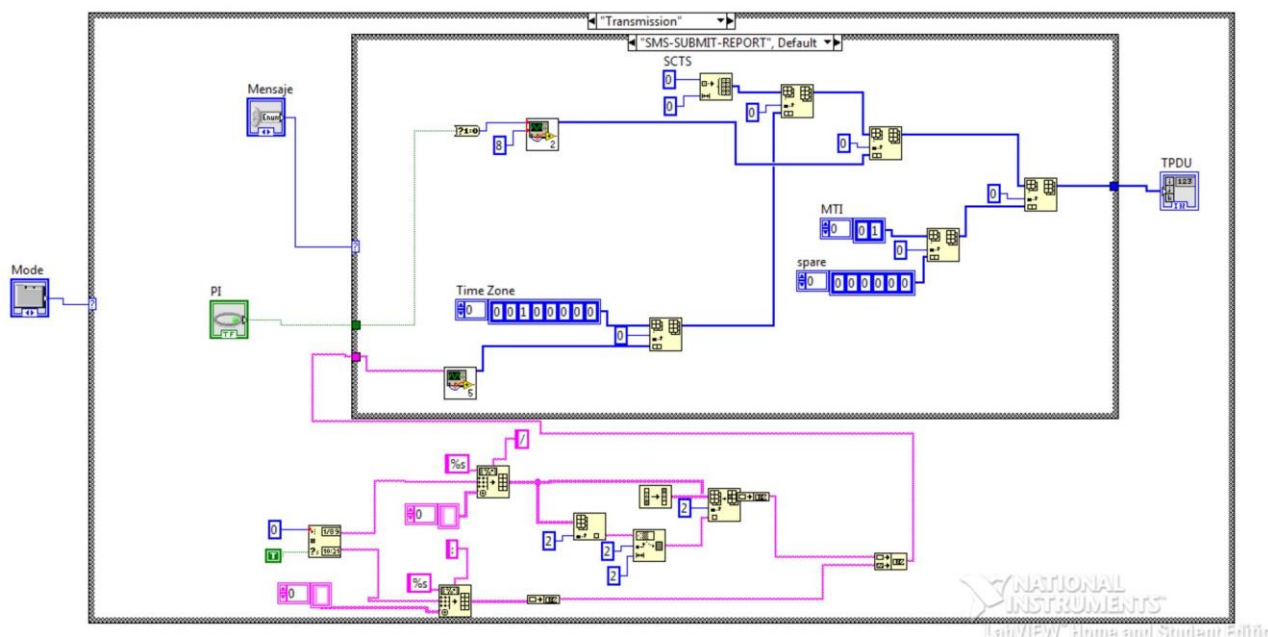


Figura 56: Diagrama de bloques “SM-TL.vi” (BS)

Las entradas del bloque son las siguientes:

- **Mode:** Entrada para seleccionar el modo de la capa.
- **Mensaje:** Permite seleccionar el tipo de mensaje a construir.
- **PI:** Sirve para indicar la presencia o no de parámetros adicionales en el mensaje. Para el desarrollo del proyecto esta entrada tomará el valor de false.

La salida “TPDU”, contiene el mensaje de la capa de transferencia completo.

El entramado de bloques y operaciones que se encuentra debajo del selector de mensaje, tiene como objetivo la obtención del timestamp y su formateo para ser incluido en el mensaje.

6.2.1.2.2.3 SM-RL

Este vi simula capa de transmisión del centro de servicios, y, posibilita la creación de los mensajes de esta capa usando los datos obtenidos de la capa de transferencia anteriormente descrita.

El bloque tiene el siguiente diagrama de bloques:

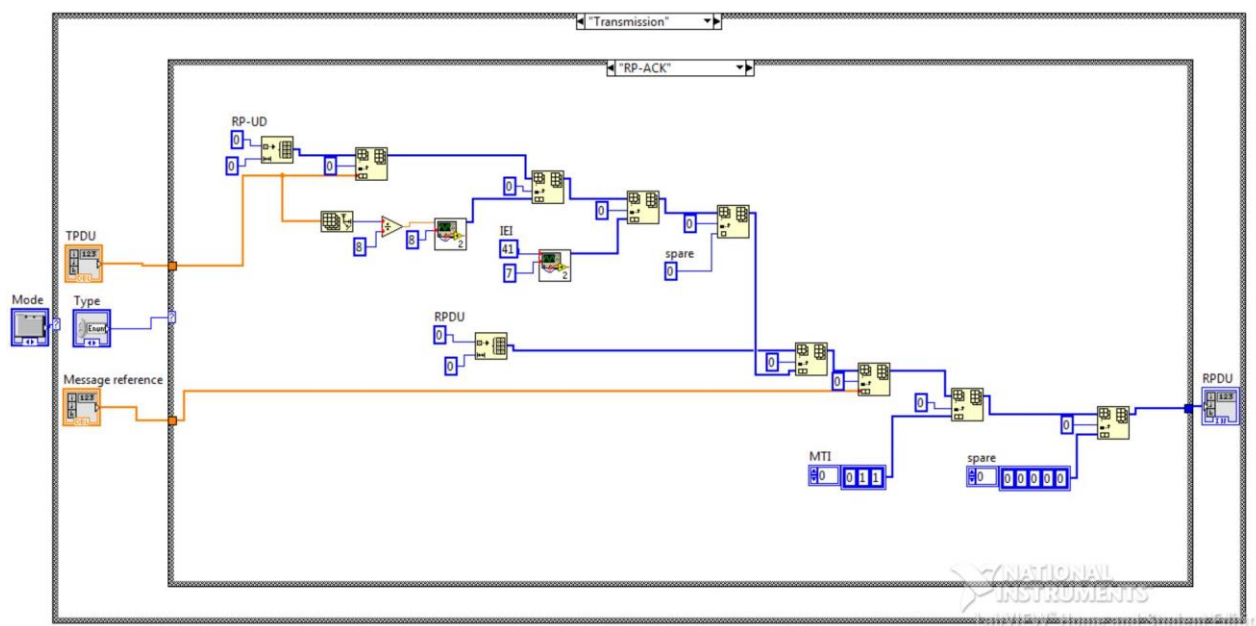


Figura 57: Diagrama de bloques “SM-RL.vi” (BS)

Presenta como entradas el seleccionador de modo de la capa, el seleccionador de mensaje a construir (Type), la entrada que recibe los datos de la capa de transferencia (TPDU) y un controlador que permite introducir la referencia del mensaje (Message Reference).

La salida, RPDU, es el mensaje de la capa SM-RL ya construido.

6.2.1.2.2.4 CM-Sublayer

El bloque “CM-Sublayer” simula la capa de gestión de las conexiones del centro de servicios, y se encarga de construir los mensajes de la misma.

Presenta la misma estructura que el bloque con el mismo nombre de la MS.

Para la obtención de cada mensaje se ha creado el bloque “Seleccionar Mensaje”. En este bloque se pasan los datos necesarios a cada capa, ya sea mediante constantes o mediante entradas para la interacción del usuario, y, se unen las capas necesarias para crear cada uno de los mensajes. A modo de ejemplo se presenta el diagrama de bloques de la construcción del mensaje CP-DATA:

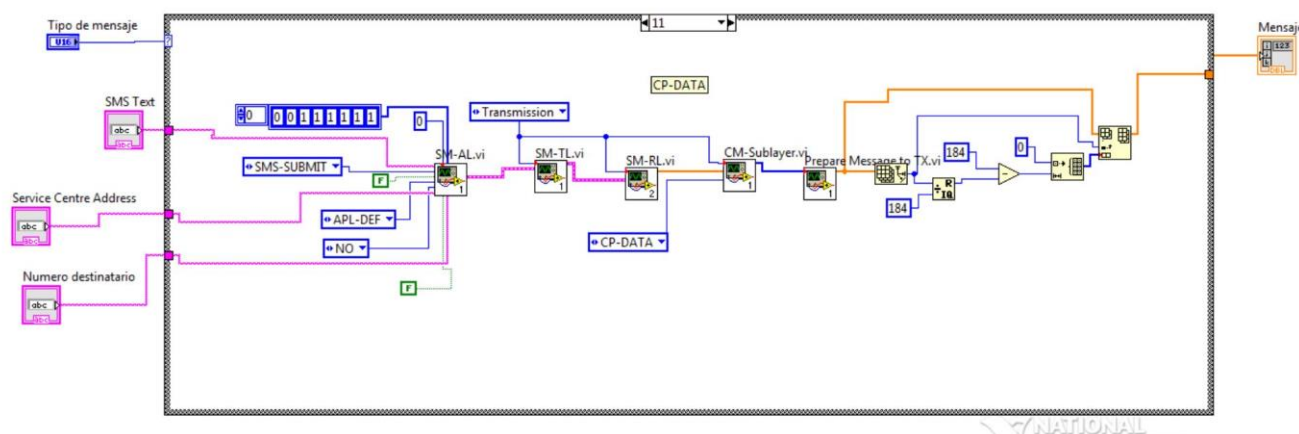


Figura 58: Diagrama de bloques "Seleccionar mensaje.vi"

La entrada tipo de mensaje sirve para seleccionar el mensaje que se desea enviar.

Las otras tres entradas sólo se usan en el caso del mensaje CP-DATA para pasarle los datos introducidos por el usuario.

La salida del bloque es el mensaje listo para ser codificado según el canal por el que se transmita.

La última parte antes de sacar el mensaje por la salida es una serie de bloques que rellenan con 0's el mensaje obtenido de las capas para adaptarlo al número de bits demandado por el canal a través del cual va a ser transmitido.

6.2.2 Codificación del canal

A lo largo de todo el proceso completo de intercambio de mensajes se usan tres canales: RACH ("Channel Request"), AGCH ("Immediate assignment") y SDCCH (Todos los demás mensajes). Debido a que en este proyecto en cuestión sólo están involucrados los mensajes descritos en el capítulo Mensajes, y ya que todos estos se transmiten por SDCCH, sólo se procederá a describir el vi que implementa este canal.

El proceso de codificación es el siguiente;

- 1: Se recibe el mensaje que va a transmitirse por el canal. Debe tener un total de 184 bits.
- 2: Se calculan los bits de paridad dividiendo el valor inicial (todo 1's) entre el polinomio convolucional. Los bits de paridad se corresponden con el resto de esta división.
- 3: Se añaden bits de cola.
- 4: Se utiliza el codificador convolucional para obtener los 456 bits que componen el mensaje codificado.
- 5: Se realiza el proceso de entrelazado del resultado.

En la siguiente figura podemos ver el diagrama de bloques que lo implementa:

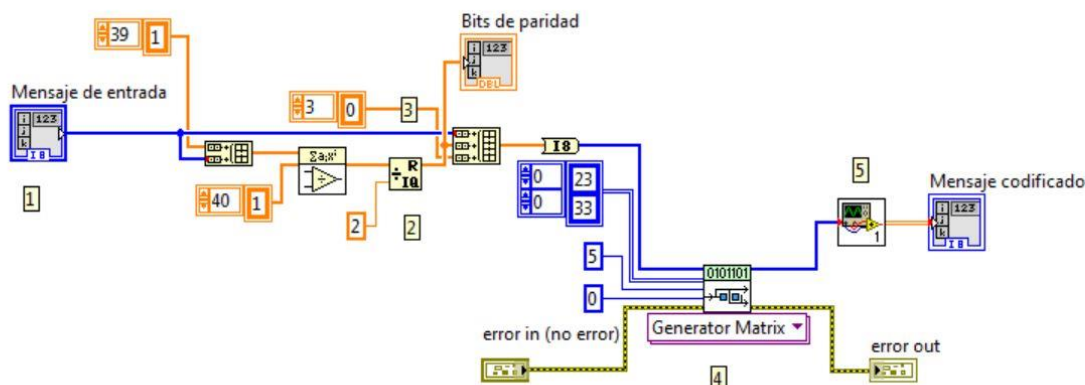


Figura 59: Diagrama de bloques "SDCCH.vi"

La única entrada que tiene el bloque es el mensaje a codificar.

La salida constituye el mensaje ya codificado según el canal SDCCH listo para ser mapeado a ráfagas.

6.2.3 Codificación de las ráfagas

Una vez obtenido el mensaje codificado según el canal que corresponda para cada mensaje, se tiene que mapear el mismo a varias ráfagas.

Al igual que en el apartado anterior, se usan varios tipos de ráfagas en el proceso completo de intercambio de mensajes, "Normal Burst", y "Access Burst" ("Channel Request"), pero los mensajes involucrados directamente en este TFG sólo usan "Normal Burst", por lo tanto se describirá la misma.

El diagrama de bloques que permite la creación de la ráfaga es el siguiente:

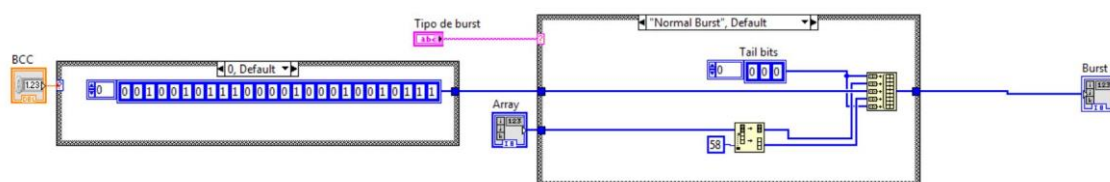


Figura 60: Diagrama de bloques "Bursts.vi"

Las entradas del bloque son las siguientes:

- **Tipo de burst:** Por ella se indica que tipo de ráfaga se desea crear.
- **BCC:** A través de esta entrada se introducen los bits correspondientes al "Base Station Color Code", los cuales son fijados por la BS a modo de secuencia de bits de entrenamiento.

- **Array:** Contiene los datos que se desean introducir en la ráfaga (114 bits).

La salida “Burst” contiene la ráfaga del mensaje ya creado.

6.2.4 Modulación

El vi “Modulador” implementa el proceso necesario para realizar la modulación de los mensajes y obtener la forma de onda resultante de dicha modulación.

Presenta el siguiente diagrama de bloques:

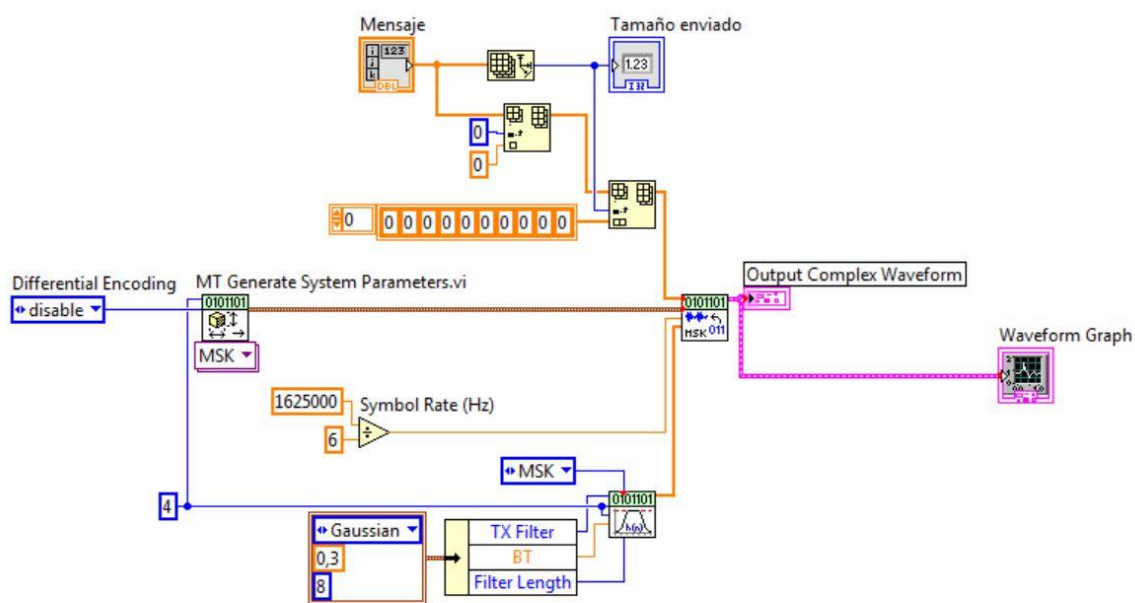


Figura 61: Diagrama de bloques "Modulador.vi"

Para la implementación del proceso de modulación se ha usado la API de LabVIEW “NI Labview Modulation Toolkit”. En concreto se han usado los siguientes bloques:

- “MT Generate System Parameters”: Mediante este vi se obtienen los parámetros necesarios para la modulación MSK.
- “MT Generate Filter Coefficients”: Proporciona los coeficientes del filtro gaussiano.
- “MT Modulate MSK”: Realiza la modulación del mensaje a enviar a partir de los parámetros de la modulación obtenidos y haciendo uso de los coeficientes del filtro gaussiano para convertirlo en una modulación GMSK.

La única entrada de este bloque permite introducir los datos que se desean modular.

La salida “Output Complex Waveform” contiene la forma de onda resultante de la modulación del mensaje.

6.2.5 Construcción de las tramas

Como ya se explicó en el apartado 3.4.1.2.1, cada trama está compuesta por la unión de 8 slots, y dentro de cada slot va una ráfaga de datos.

Con el bloque CreateSlots se crea cada slot para incluirlo en la trama lista para transmitir.

Este vi presenta el siguiente diagrama de bloques:

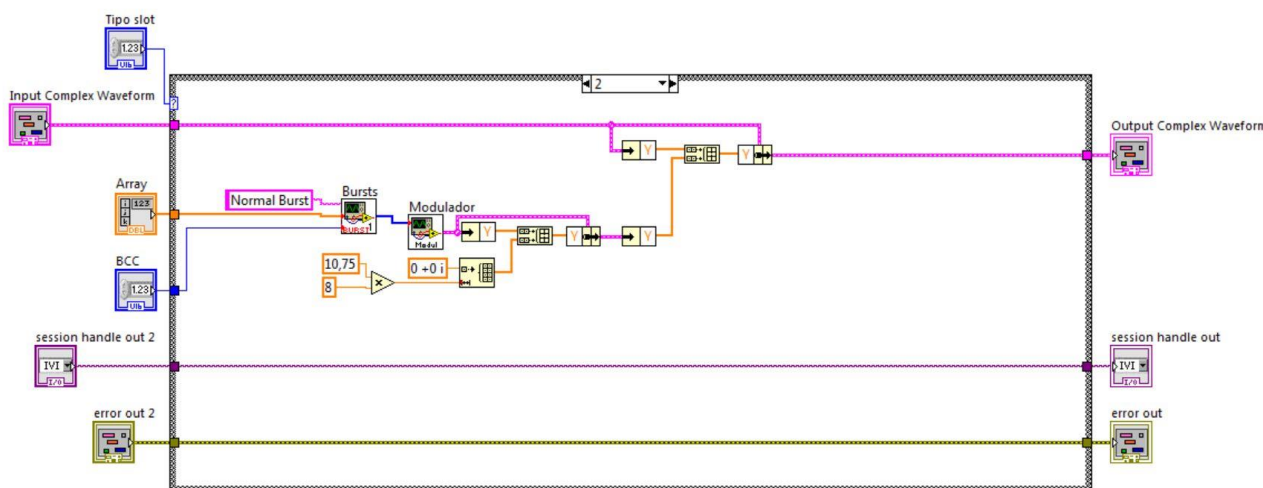


Figura 62: Diagrama de bloques "CreateSlots.vi"

Las entradas del bloque son las siguientes:

- **Tipo Slot:** Permite seleccionar el tipo del slot que deseamos crear. Cada tipo se usa para la transmisión de un tipo de ráfaga. Como ya se explicó en el apartado en el que se hablaba de las ráfagas, sólo se usará la ráfaga "Normal Burst", que se corresponde con el tipo 2.
- **Input Complex Waveform:** Posibilita la introducción de una forma de onda para introducir en ella la forma de onda resultante de la modulación de los datos contenidos en el slot.
- **Array:** Son los datos que serán mapeados a la ráfaga y modulados posteriormente.
- **BCC:** Contendrá el número BCC para la construcción de la ráfaga.
- **Session handle out 2:** Es un parámetro de configuración del USRP y permite transmitir la sesión del USRP en funcionamiento a lo largo de la ejecución del mismo.
- **Error out 2:** Esta entrada sirve para hacer un seguimiento de los errores producidos durante la ejecución del programa.

La salida principal "Output Complex Waveform" es la forma de onda resultante de la inclusión del nuevo slot.

Para terminar de formar la trama completa han de unirse los 8 slots. Este proceso se realiza en el vi Slots, que presenta el siguiente diagrama de bloques:

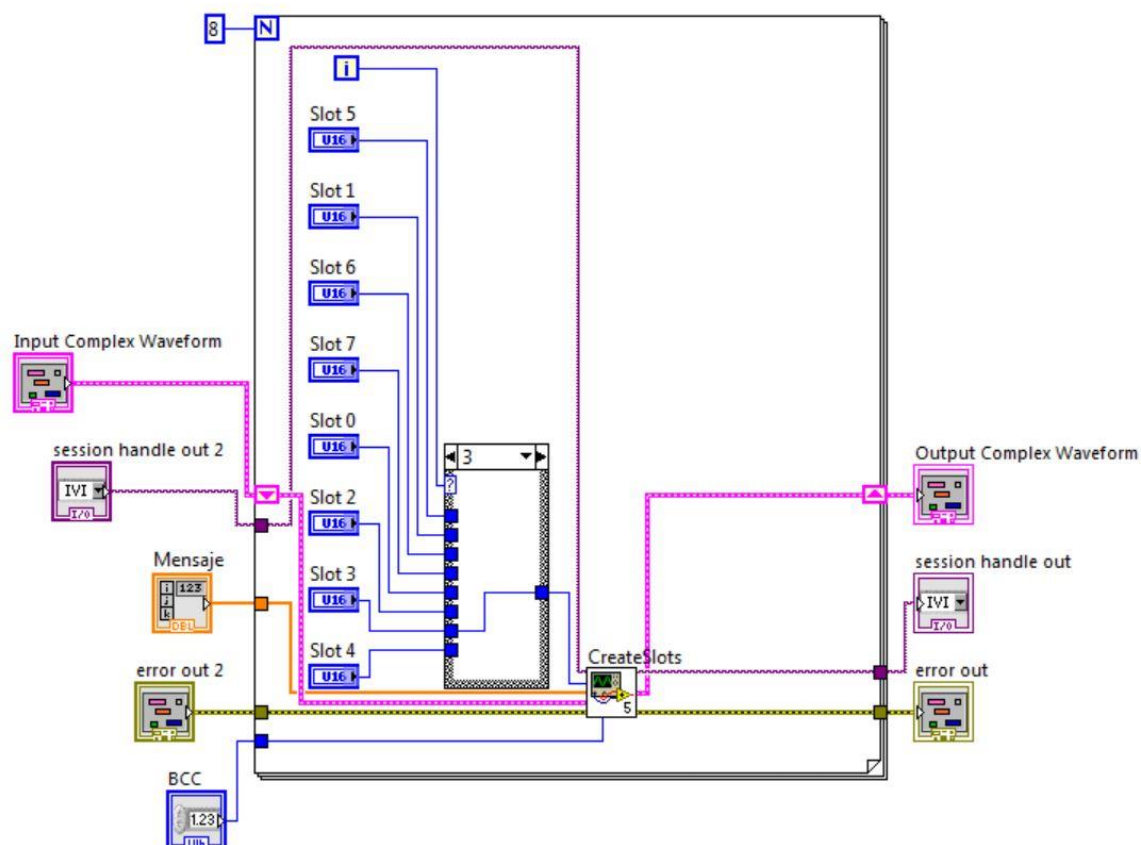


Figura 63: Diagrama de bloques "Slots.vi"

Como entradas presenta las siguientes:

- **Slot 1, Slot 2...:** Sirven para indicar el tipo del slot.
- **Input Complex Waveform:** Permite introducir al bloque una forma de onda en la que incluir la trama.
- **Mensaje:** Contiene los datos que llevará la trama.
- **BCC:** Permite introducir el parámetro BCC necesario para la construcción de la "Normal Burst".

Las otras dos entradas se corresponden con la sesión del USRP y la entrada de seguimiento de errores de ejecución del programa.

En cuanto a las salidas, el vi presenta la salida que contiene la forma de onda resultante de la inclusión de la trama, la salida de la sesión del USRP y la de seguimiento de errores.

6.2.6 Transmisión de tramas

Esta parte del diseño del software final requiere la implementación de un sistema para enviar las tramas por radiofrecuencia haciendo uso del USRP.

Para realizar esto, se han realizado dos partes. Una primera parte en la que se crea la forma de onda que contiene todas las tramas del mensaje que se desea mandar ya moduladas. Y, una segunda parte, en la que haciendo uso de la api NI-USRP para la interacción de LabVIEW con el transceptor, se transmiten las formas de onda obtenidas en la primera parte.

6.2.6.1 Obtención de forma de onda

Usando los bloques descritos en el apartado de construcción de las tramas se obtiene la forma de onda de cada trama que compone el mensaje, y, en esta parte del diseño se juntan dichas formas de onda para obtener la onda completa que contiene todas las tramas del mensaje moduladas, lista para ser transmitida.

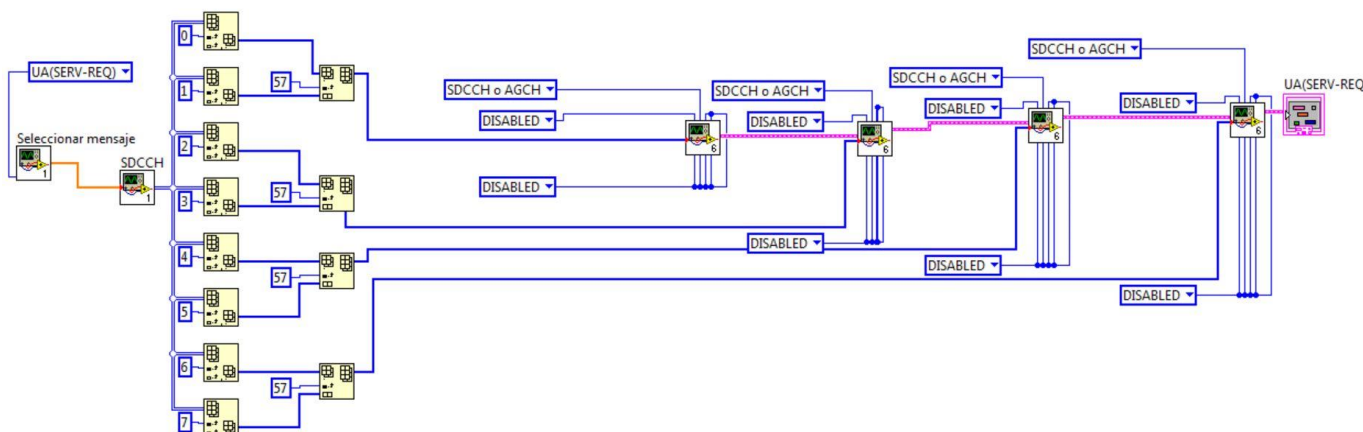


Figura 64: Diagrama de bloques "Elegir mensaje modulado.vi"

Para todos los mensajes, exceptuando los mensajes CP-DATA, se ha usado el siguiente diagrama de bloques para realizar el proceso descrito:

El vi presenta las siguientes entradas:

- **BCC:** Por esta entrada se introduce el código BCC para ser transferido al bloque de codificación de las ráfagas.
- **Sesion handle in:** Sirve para realizar un seguimiento de la sesión del USRP.

Las salidas del bloque se corresponden a las formas de onda de todos los mensajes que permite obtener (Todos menos CP-DATA).

El vi SDCCH como salida nos proporciona el mensaje ya codificado dividido en 8 partes. Se unen las partes 2 a 2 y cada una de las uniones se pasa por el bloque Slots.vi, que a su salida presenta la forma de onda resultante de la modulación de dicha unión. Esta forma de onda se va transmitiendo para ir incluyendo las formas de onda del resto de tramas del mensaje, y, de esta forma, obtener al final la forma de onda que contiene todas las tramas del mensaje lista para ser transmitida.

Los mensajes CP-DATA se han incluido en otro bloque aparte debido a que a diferencia del resto de mensajes, por un lado, se transmiten mediante 5 tramas en vez de 4, y, por otro lado, necesitan más de un canal SDCCH para su transmisión completa.

El motivo por el que se ha decidido transmitir los canales que llevan los mensajes CP-DATA mediante 5 tramas, es la inclusión de cabeceras aparte de los propios datos del mensaje.

Los mensajes CP-DATA contienen en gran parte datos variables desconocidos por el receptor del mensaje (caracteres del texto del SMS codificados, números del centro de servicios y el destinatario codificados...), por ello, en el receptor, no se puede comparar con un patrón conocido para realizar la búsqueda de las tramas del mensaje en el array de datos recibidos por el USRP.

Por otra parte, el mensaje CP-DATA enviado por la MS, ocupa más de 184 bits, que es la cantidad de información que se puede transmitir en un canal SDCCH. Por ello, tras su modulación no se obtendrá una única forma de onda, si no varias, una por cada canal necesario para la transmisión del mensaje completo.

Así pues, las cabeceras proporcionan varias ventajas: capacidad para discriminar las tramas pertenecientes al mensaje CP-DATA en el receptor, capacidad para obtener las tramas en el orden correcto para la posterior obtención de cada canal usado en la transmisión del mensaje, y, capacidad para determinar cuándo se debe dejar de buscar las tramas de los canales del mensaje CP-DATA.

El diagrama de bloques del vi que permite obtener las formas de onda de los mensajes CP-DATA es el siguiente:

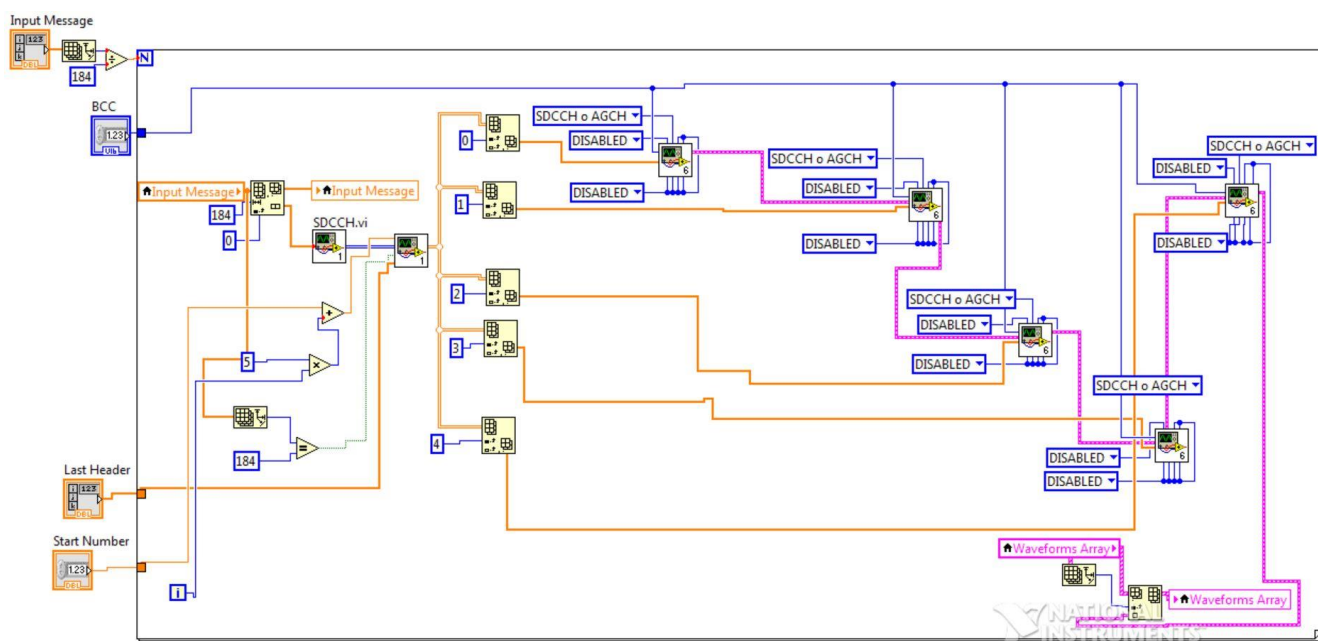


Figura 65: Diagrama de bloques "GetWaveforms.vi"

Las entradas del bloque son:

- **Input Message:** Contiene el mensaje CP-DATA.
- **BCC:** Por esta entrada se introduce el código BCC para ser transferido al bloque de codificación de las ráfagas.

- **Last Header:** Contiene la cabecera que ha de contener la última trama del último canal usado para la transmisión del mensaje completo. Esta cabecera servirá para que el receptor determine el fin de la búsqueda de tramas relacionadas con CP-DATA.
- **Start number:** Mediante este controlador se determina la cabecera de inicio para ser incluida en la primera trama del primer canal SDCCH usado. El resto de cabeceras seguirán un orden incremental para poder realizar una búsqueda ordenada de las tramas en el receptor. Esta entrada se ha incluido debido a que se transmiten en el proceso dos mensajes CP-DATA distintos, uno desde la estación móvil y otro desde la estación base.

La salida “Waveforms Array” contiene las formas de onda de cada canal modulado usado para la transmisión del CP-DATA completo.

El funcionamiento del vi es similar al usado para el resto de mensajes, pero, con las siguientes diferencias: antes de pasar el mensaje al canal lógico, este se divide en varias partes para que completen los 184 bits permitidos por el mismo, las partes del canal SDCCH se pasan por un bloque que añade las cabeceras a cada una de las partes, y, por último, este proceso se realiza el número de veces necesario para transmitir todos los canales que se requieren para el envío del mensaje completo.

6.2.6.2 Transmisión de la forma de onda

Esta parte no supone un bloque funcional completo, si no, una parte de los bloques que implementan la MS y la BS.

El diagrama de bloques de dicha parte es el siguiente:

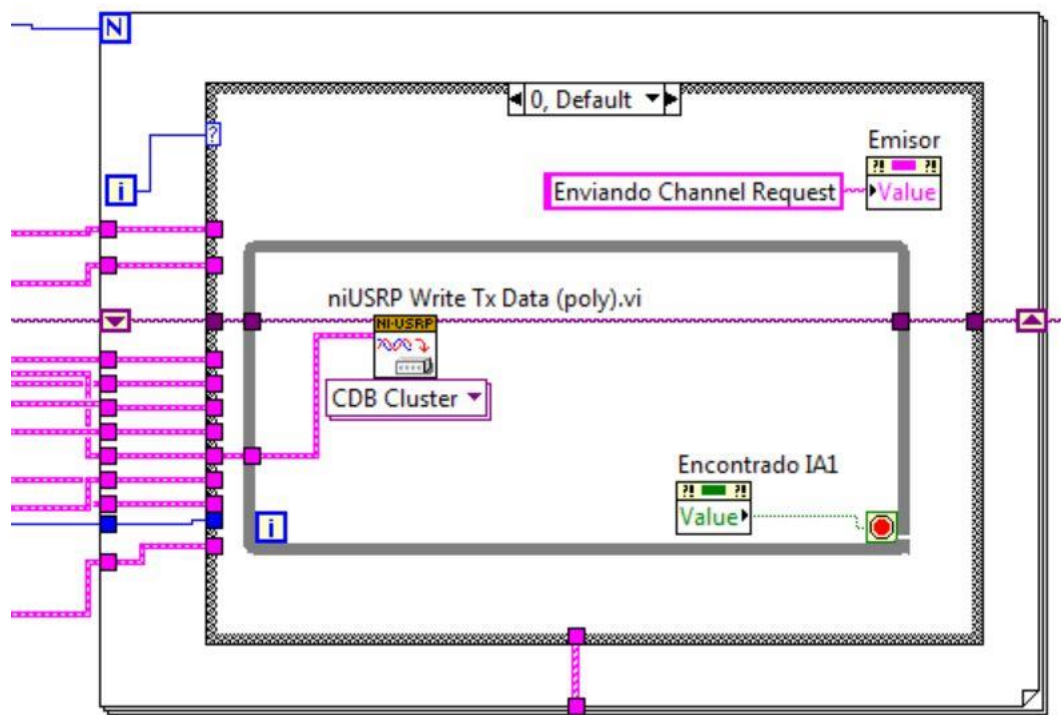


Figura 66: Diagrama de bloques transmisión (envío)

Este diagrama está compuesto de un bucle que recibe todas las formas de onda de todos los mensajes a transmitir y va realizando su transmisión en orden.

Para la transmisión de cada forma de onda se ha usado el vi “niUSRP Write Tx Data” que recibe la forma de onda a transmitir y la sesión abierta y previamente configurada del transceptor.

Las condiciones de parada del bucle de transmisión indican la recepción de cada mensaje esperado para enviar los mensajes siguiendo la secuencia indicada.

En el ejemplo de la figura del diagrama del transmisor, se envía el mensaje “Channel Request” mediante un bucle que termina cuando el receptor le notifica que se ha recibido la primera trama del siguiente mensaje (“Inmediate Assignment”). La siguiente iteración del bucle de transmisión general, sigue el siguiente diagrama:

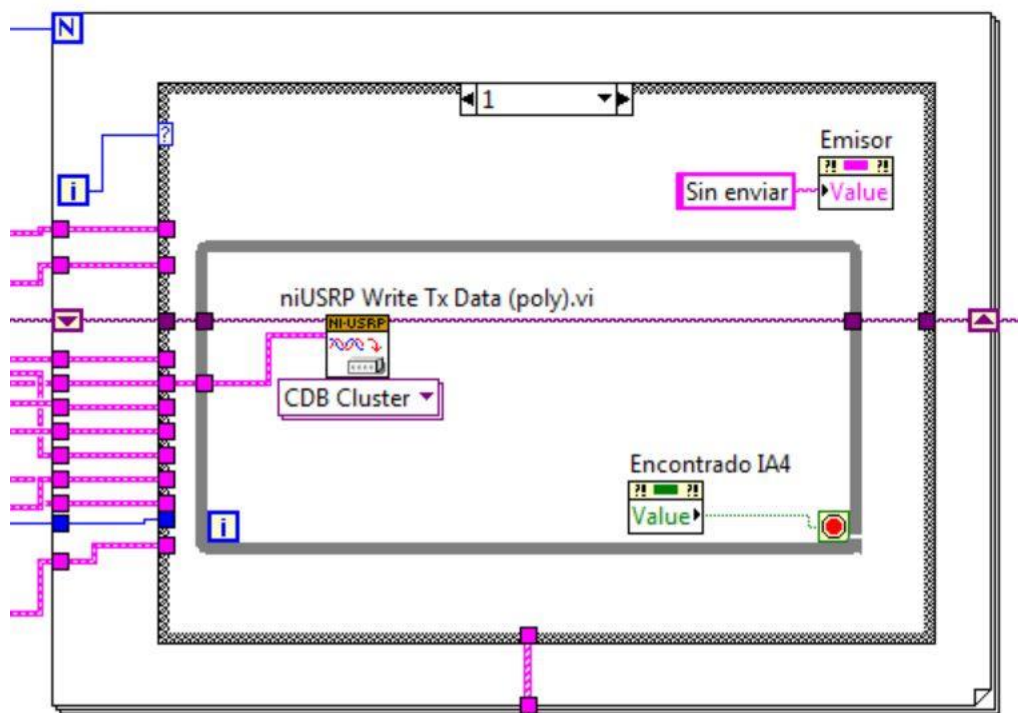


Figura 67: Diagrama de bloques transmisión (espera)

El bloque de transmisión se queda esperando hasta que el receptor le indique que se ha recibido el mensaje “Inmediate Assignment” completo, y, posteriormente se procede a la transmisión del siguiente mensaje. Así se consigue mantener la secuencia de intercambio de mensajes en orden.

6.2.7 Demodulación

Esta parte del diseño permite a partir de una forma de onda recibida por el USRP, obtener los bits correspondientes a dicha onda.

El diagrama de bloques del vi “Receptor Patron” que lo implementa es el siguiente:

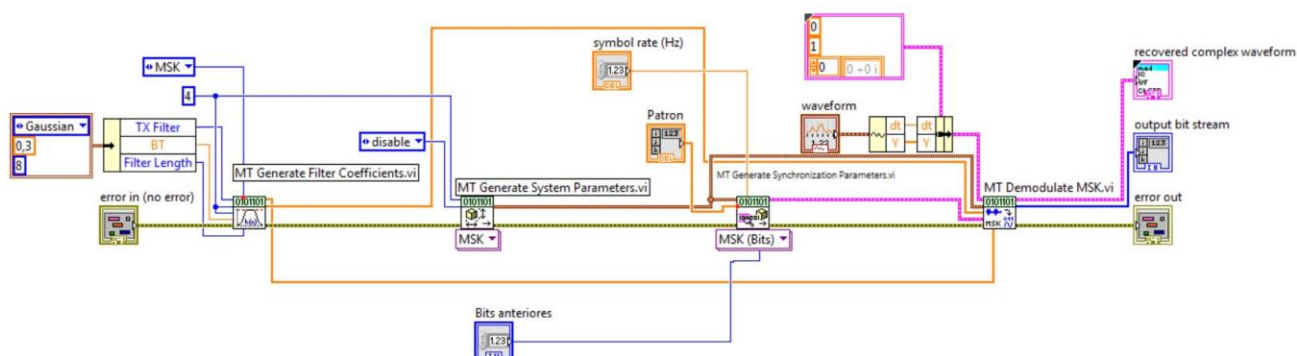


Figura 68: Diagrama de bloques "Receptor Patron.vi"

Este bloque tiene las siguientes entradas:

- **Waveform:** A través de esta entrada se le pasa al bloque la forma de onda recibida por el USRP.
- **Patron:** Esta entrada contendrá el patrón de sincronización de las tramas. Estos bits se usarán para asegurarse de que el array de bits obtenido a la salida se contiene el patrón indicado.
- **Symbol rate:** Indica la cantidad de información por segundo a la que se transmiten los datos.
- **Error in:** Esta entrada permite realizar un seguimiento de los errores ocurridos en la ejecución del programa.
- **Bits anteriores:** Permite introducir el número de bits previos al mensaje buscado para que el array de bits obtenidos comience a partir de dicha posición.

La salida principal del bloque "output bit stream", contiene los datos demodulados a partir de la forma de onda recogida de la entrada "Waveform".

Para la implementación del proceso de demodulación se ha usado la API de LabVIEW "NI Labview Modulation Toolkit". En concreto se han usado los siguientes bloques:

- "MT Generate System Parameters": Mediante este vi se obtienen los parámetros necesarios para la modulación MSK.

- "MT Generate Filter Coefficients": Proporciona los coeficientes del filtro gaussiano.

- "MT Generate Synchronization Parameters": Este bloque permite crear los parámetros de sincronización para obtener el mensaje con el patrón indicado a partir de los bits del patrón de sincronización.

- "MT Demodulate MSK": Este es el bloque principal ya que es el que realiza la demodulación de la forma de onda a partir de los parámetros del sistema obtenidos, con un filtro gaussiano determinado por los coeficientes que se pasan como entrada y usando los parámetros de sincronización determinados.

6.2.8 Recepción de tramas

Esta parte del diseño trata la implementación del sistema de recepción de los mensajes. Al igual que la parte que realiza la transmisión, esta parte no supone un bloque completo, sino una parte de los bloques que implementan la BS y la MS.

El diagrama de bloques de dicha parte es el siguiente:

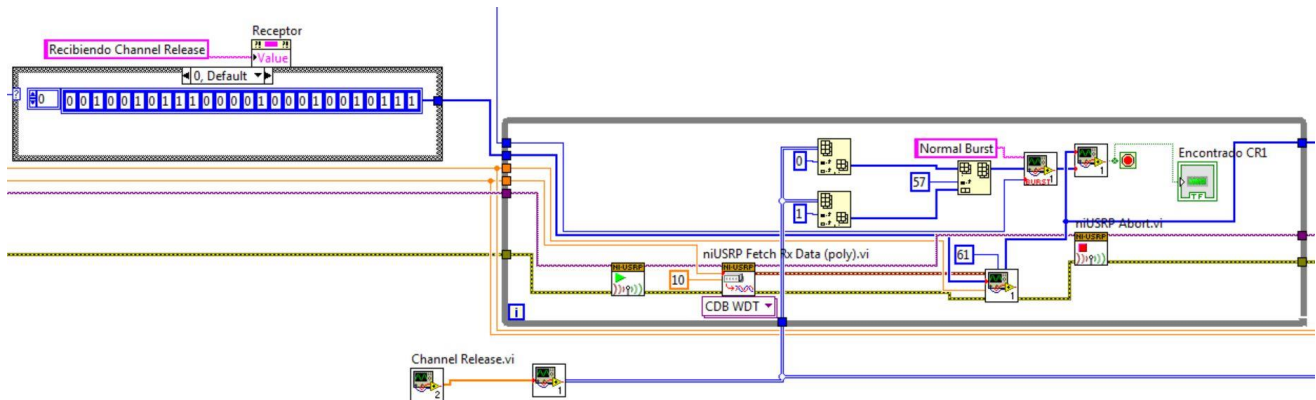


Figura 69: Diagrama de bloques recepción

El sistema consta de un bucle en el que se recogen los datos recibidos mediante el vi “niUSRP Fetch Data (poly)”. Este vi proporciona la forma de onda recibida por el transceptor. Esta forma de onda se pasa por el bloque “Receptor patrón” descrito anteriormente que convierte la forma de onda en un array de bits. Posteriormente, el array de bits se pasa a un bloque que va recorriéndolo y va comparándolo con el patrón conocido de la trama que se busca. Esta operación se realiza una y otra vez hasta que se encuentra la trama. Una vez encontrada se activa un indicador con el identificador de la trama como nombre que sirve para mantener la secuencia del proceso de transmisión (descrito en el apartado anterior), y para poder realizar un seguimiento del proceso en el panel frontal.

Este proceso se realiza para cada una de las tramas, y, una vez obtenidas todas las tramas del mensaje que se está recibiendo, se eliminan las ráfagas de cada una y se juntan para obtener el mensaje dentro del canal. Posteriormente se realizará la decodificación de los datos obtenidos para obtener el mensaje original.

En el caso particular de los mensajes CP-DATA, para buscar la trama, se comparan las cabeceras con la indicada en cada momento. Además, el proceso de recepción de cada trama se realiza 5 veces en vez de 4 y, se repite todo entero hasta que se reciba la cabecera que indica el final de la recepción.

6.2.9 Decodificación del canal

Esta es la última parte del diseño, que implica la implementación de un sistema de decodificación de los canales para poder obtener el mensaje original enviado en el receptor.

El vi que realiza el proceso de decodificación del canal SDCCH presenta el siguiente diagrama de bloques:

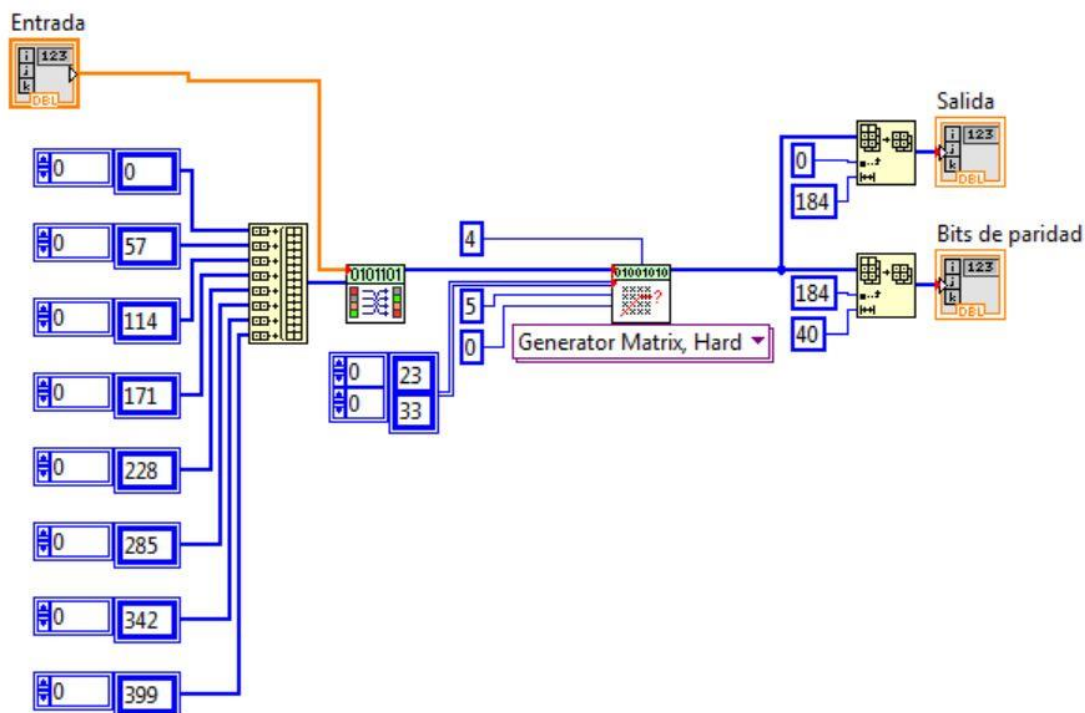


Figura 70: Diagrama de bloques "Decodificador SDCCH.vi"

La única entrada que presenta el vi posibilita la introducción del array de bits a decodificar.

La salida principal del bloque contiene los bits correspondientes al mensaje ya decodificado por completo.

Para la implementación del proceso de decodificación se ha usado de nuevo la API de LabVIEW "NI Labview Modulation Toolkit". En concreto se han usado los siguientes bloques:

- “MT Permute”: Este bloque cambia la posición de los elementos del array de datos en base a un array de permutaciones que se pasa como entrada. Esto se realiza para deshacer el entrelazado.
- “MT Convolutional Decode”: Deshace la codificación convolucional de los datos pasados como entrada.

6.2.10 Integración

La última fase del diseño supone integrar todos los bloques y los procesos anteriormente descritos para a partir de los datos de entrada necesarios introducidos por el usuario, poder realizar todo el proceso de intercambio de mensajes hasta su conclusión. Además, en esta parte se han implementado funcionalidades añadidas necesarias como la parte de configuración del USRP.

La fase de integración implica el diseño de dos bloques principales, el bloque MS que simula la estación móvil y sus funciones, y, el bloque BTS que simula la estación base y sus funciones con el centro de servicios incluido en ella.

A continuación se explicará el proceso de intercambio de mensajes que sigue el software una vez integrados todos los bloques funcionales. Como en el resto de la memoria se describirá la parte del proceso que pertenece al servicio de SMS.

6.2.10.1 MS

El proceso seguido por el bloque que se corresponde con la estación móvil durante su ejecución es el siguiente:

- Primero se procede a enviar el mensaje SABM (SAPI=3). El envío finaliza cuando se recibe la primera trama del asentimiento al mensaje (UA (SAPI=3)). Posteriormente el programa espera sin transmitir hasta que se detecta la última parte del asentimiento.

- Se envía el mensaje CP-DATA entero, para, después, esperar sin transmitir hasta que se reciben los mensajes CP-ACK y CP-DATA de la estación base.

- En este punto del programa se realiza el envío del asentimiento (CP-ACK) al mensaje CP-DATA, el cual termina cuando se detecta la primera trama del mensaje "Channel Release". El transmisor pasa a modo de esperar sin enviar datos hasta que el receptor le notifique que se ha recibido el "Channel Release" completo.

- Por último se envía el mensaje DISC hasta que se detecta la primera trama del asentimiento (UA (DISC)).

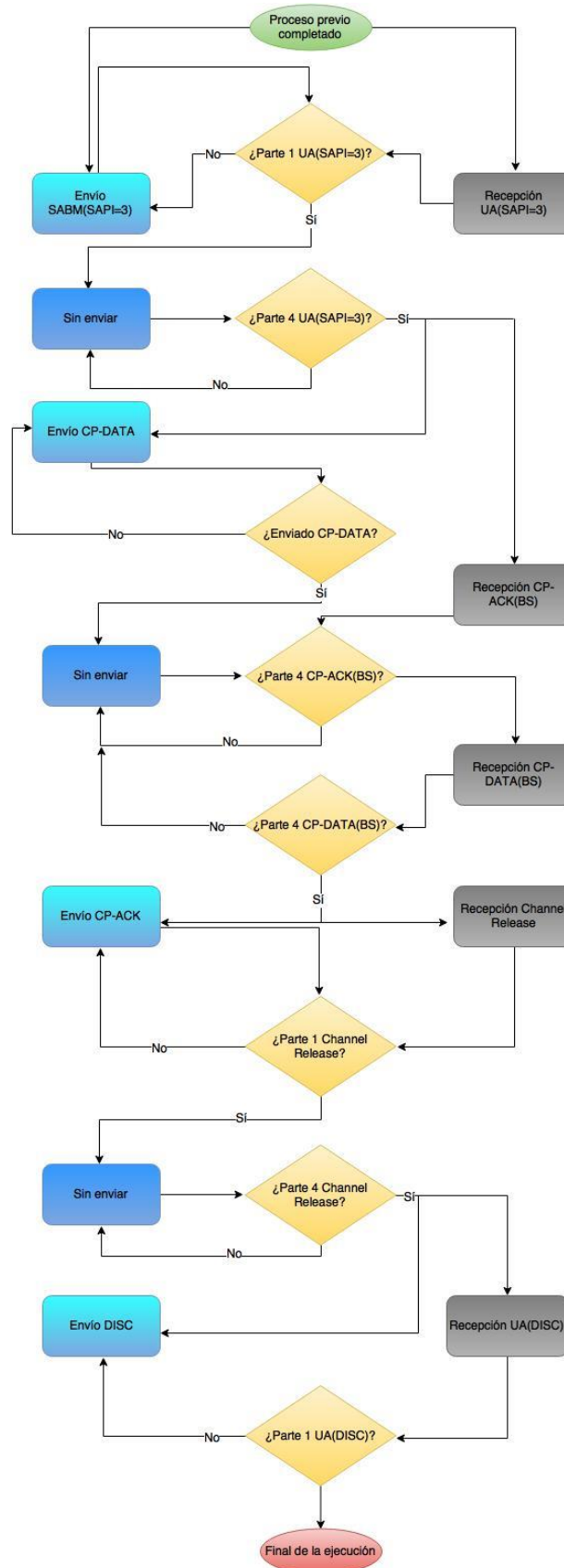


Figura 71: Funcionamiento "MS.vi"

6.2.10.2 *BTS*

El proceso seguido por el bloque que se corresponde con la estación base durante su ejecución es el siguiente:

- El transmisor espera sin enviar datos hasta que se reciba el mensaje SABM (SAPI=3).
- Se transmite el asentimiento del comando (UA (SAPI=3)) mientras el receptor espera el mensaje CP-DATA de la estación móvil.
- Se dejan de enviar datos hasta que se detecte la última trama del mensaje CP-DATA enviado por la MS.
- Se transmite primero por completo el mensaje CP-ACK, y, a continuación el mensaje CP-DATA que contiene el asentimiento de los mensajes del servicio de SMS recibidos previamente.
- El transmisor permanece a la espera de que el receptor le índice la recepción del asentimiento CP-ACK por parte de la MS.
- Se procede al envío del mensaje Channel Release para la liberación del canal usado una vez terminado el intercambio de mensajes relativos al servicio de mensajes cortos.
- Por último se espera la recepción del mensaje DISC. Una vez recibido se transmite el mensaje UA (DISC) y se procede a finalizar el programa.

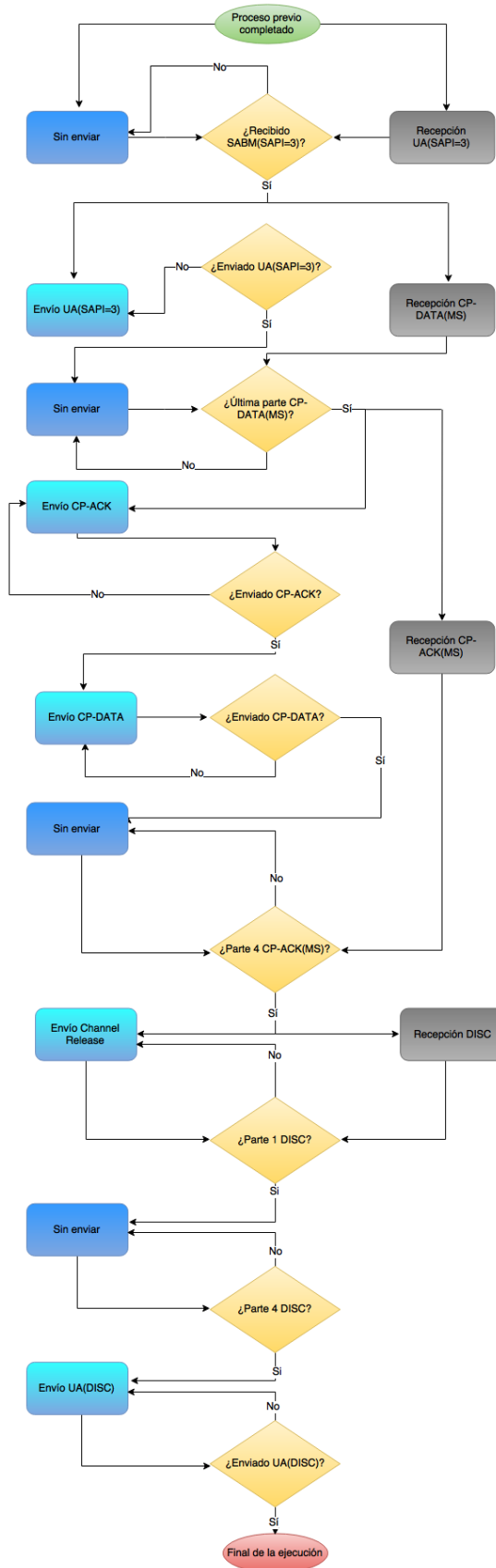


Figura 72: Funcionamiento "BTS.vi"

6.3 Interfaz de usuario

Como ya se explicó en el capítulo en el que se describía LabVIEW, los bloques creados con dicho software tienen una parte denominada panel frontal que permite la interacción del usuario. En este caso el usuario dispondrá de dos paneles frontales en los que podrá controlar y monitorizar el proceso de intercambio de mensajes, uno para el bloque que corresponde a la MS y otro para la BTS.

6.3.1 MS

El panel frontal del bloque que simula la estación móvil es el siguiente:

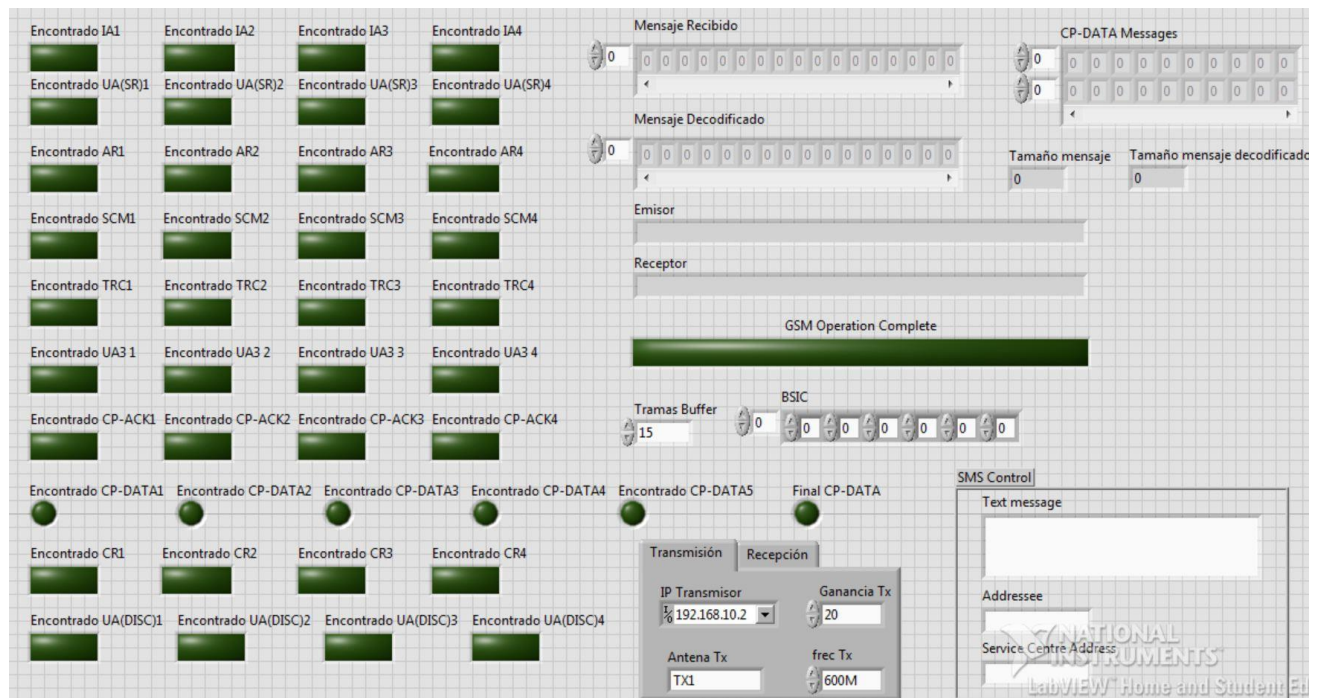


Figura 73: Panel frontal "MS.vi"

La interfaz presenta los siguientes componentes:

- **Indicadores LED:** Los indicadores LED se activan cada vez que se recibe la parte de cada mensaje que llevan por nombre, por ejemplo, el indicador "Encontrado IA1" se activa cuando el receptor encuentra la primera trama del mensaje "Immediate Assignment".
- **Transmisión/Recepción:** Esta sección sirve para controlar los parámetros de transmisión o recepción. Se pueden configurar: la dirección IP del transmisor y el receptor(USRP), la ganancia tanto de transmisión como de recepción, los nombres de las antenas usadas para cada modo y la frecuencia para cada modo.
- **Tramas Buffer:** Este parámetro permite configurar el número de tramas del buffer de recepción.
- **BSIC:** A partir de este parámetro se obtiene el BCC.

- **Mensaje recibido:** Muestra el array de bits que se corresponde con el mensaje recibido, se actualiza cada vez que se recibe un mensaje completo nuevo.
- **Mensaje decodificado:** Muestra el array de bits que se corresponde con el mensaje decodificado, se actualiza cada vez que se decodifica un nuevo mensaje.
- **CP-Data Messages:** Muestra un array en el que cada posición es un canal que contiene una parte del mensaje CP-DATA.
- **Tamaño mensaje/mensaje decodificado:** En estos indicadores se presenta la longitud en bits de los mensajes recibidos y decodificados.
- **Emisor/Receptor:** En estos campos se indica el estado en el que se encuentran el emisor y el receptor respectivamente.
- **SMS Control:** Esta sección permite la introducción por parte del usuario de los datos necesarios para el envío de un SMS. Se puede introducir el texto del SMS, el número de teléfono del destinatario del mismo y el centro de servicios asociado.

6.3.2 BTS

El panel frontal del bloque que simula la estación base es el siguiente:

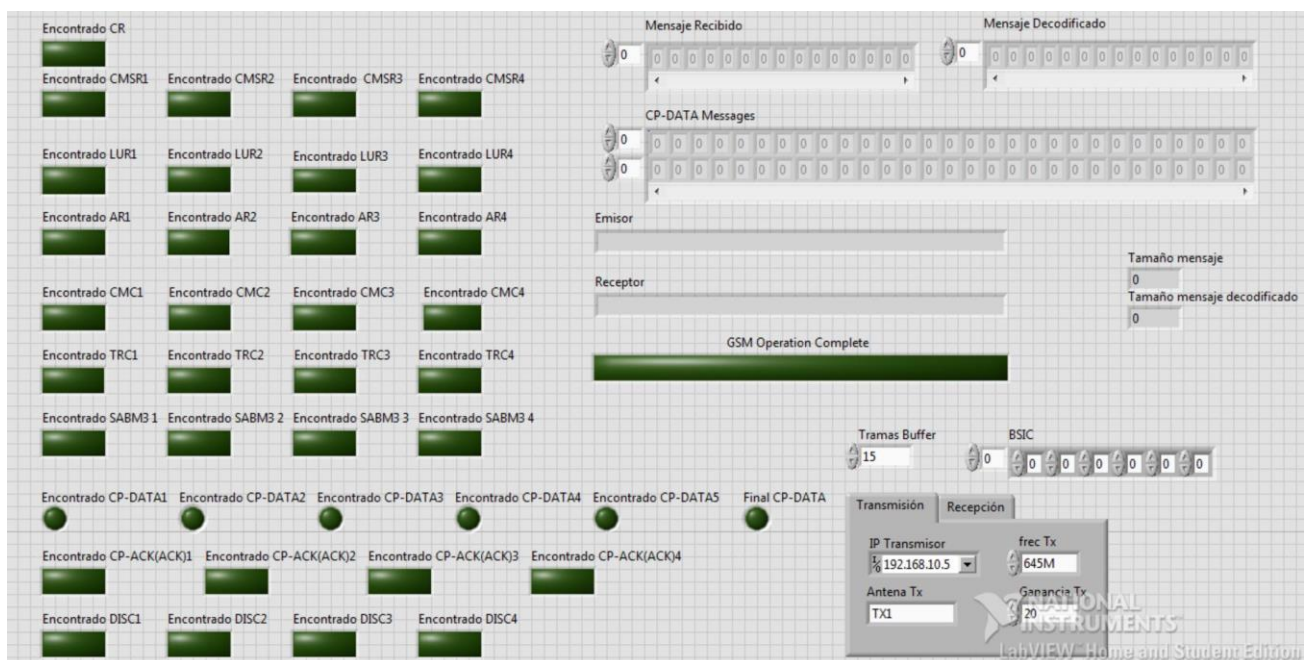


Figura 74: Panel frontal "BTS.vi"

Los componentes de la interfaz tienen la misma funcionalidad que la descrita para la estación móvil, aplicados a los datos y parámetros de la estación base. La única diferencia existente es la ausencia del control de SMS ya que la estación base no introduce ningún dato para dicho servicio.

7. PRUEBAS FINALES

La última parte del desarrollo del presente TFG es la realización de pruebas del sistema completo para comprobar el correcto funcionamiento del software implementado. No se han realizado pruebas de decodificación, de codificación de canal, de modulación o de demodulación ya que como se explica a lo largo del documento, este proyecto es una continuación de otros TFGs en los que ya se realizaron dichas pruebas, y de los que se han usado diversos bloques funcionales ya testados.

Por tanto, las pruebas realizadas para este TFG en concreto consisten en la comprobación del proceso completo de intercambio de mensajes, el cual se muestra a continuación, y, en la comprobación de la correcta construcción y codificación de los mensajes relacionados con el servicio de mensajes cortos.

En primer lugar, se ha de montar el sistema completo, es decir, conectar adecuadamente los transceptores para poder ser controlados desde el pc, y, conectar las antenas para posibilitar la transmisión y la recepción de datos en ambos USRP's. En la siguiente figura se muestra una imagen del sistema completo listo para ser usado. Una vez montado el sistema de hardware necesario ya se pueden comenzar con las pruebas de software.



Figura 75: Sistema final completo

Al principio del proceso se arrancan a la vez los bloques MS y BS, configurando previamente los parámetros de recepción y transmisión, y, en el caso del vi MS, introduciendo los campos necesarios para el envío del SMS (texto, destinatario y centro de servicios).

Se muestran a continuación las capturas del programa previo al inicio:

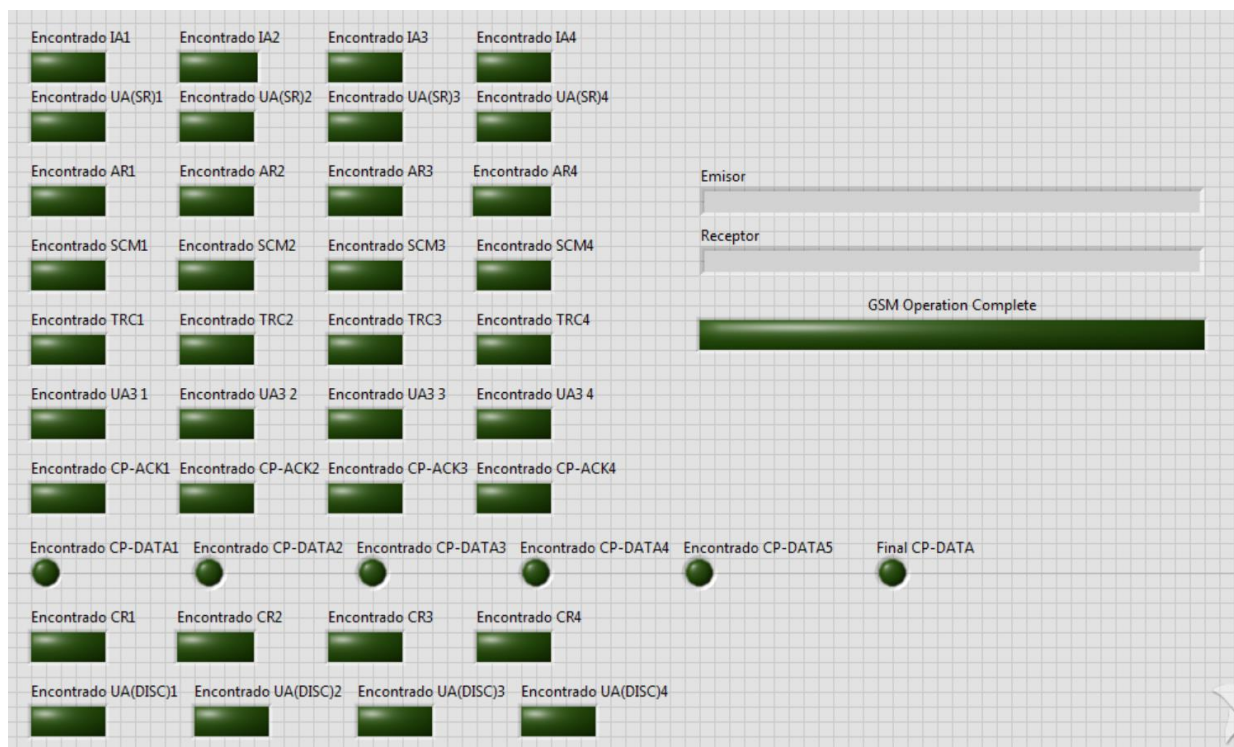


Figura 76: "MS.vi" Inicio

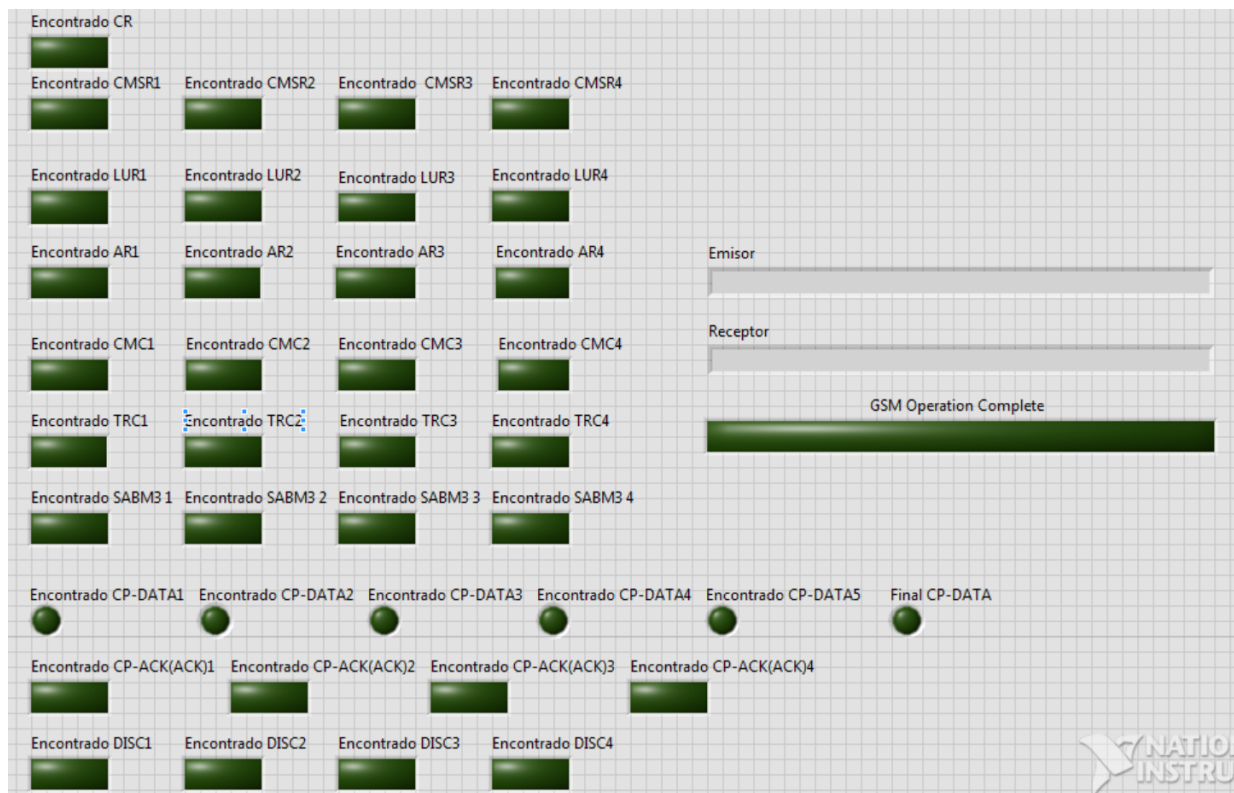


Figura 77: "BTS.vi" Inicio

La siguiente figura muestra el estado del panel frontal del bloque BTS ya se han realizado los procesos de asignación de canal, "Location Update", autenticación y petición del servicio de SMS. El receptor se encuentra esperando los canales que contienen el mensaje CP-DATA con el SMS.

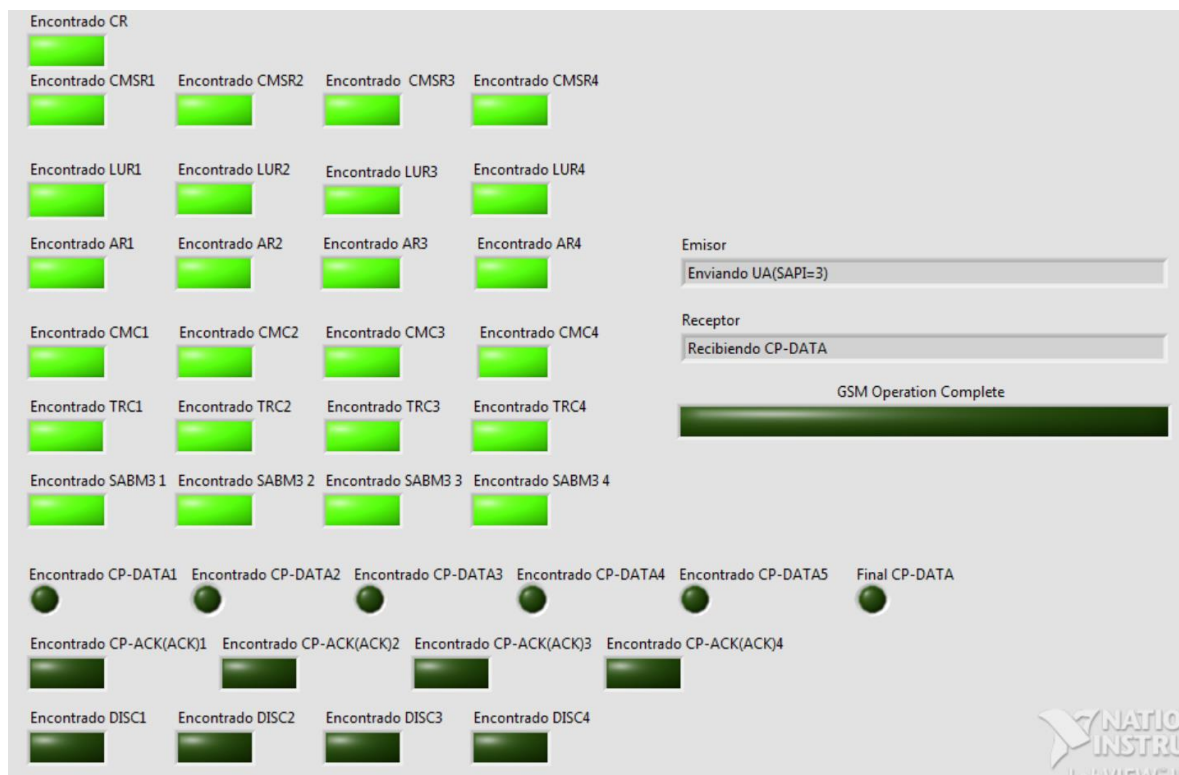


Figura 78: "BTS.vi" Antes de CP-DATA

A continuación el receptor recibe el primer canal del mensaje CP-DATA.

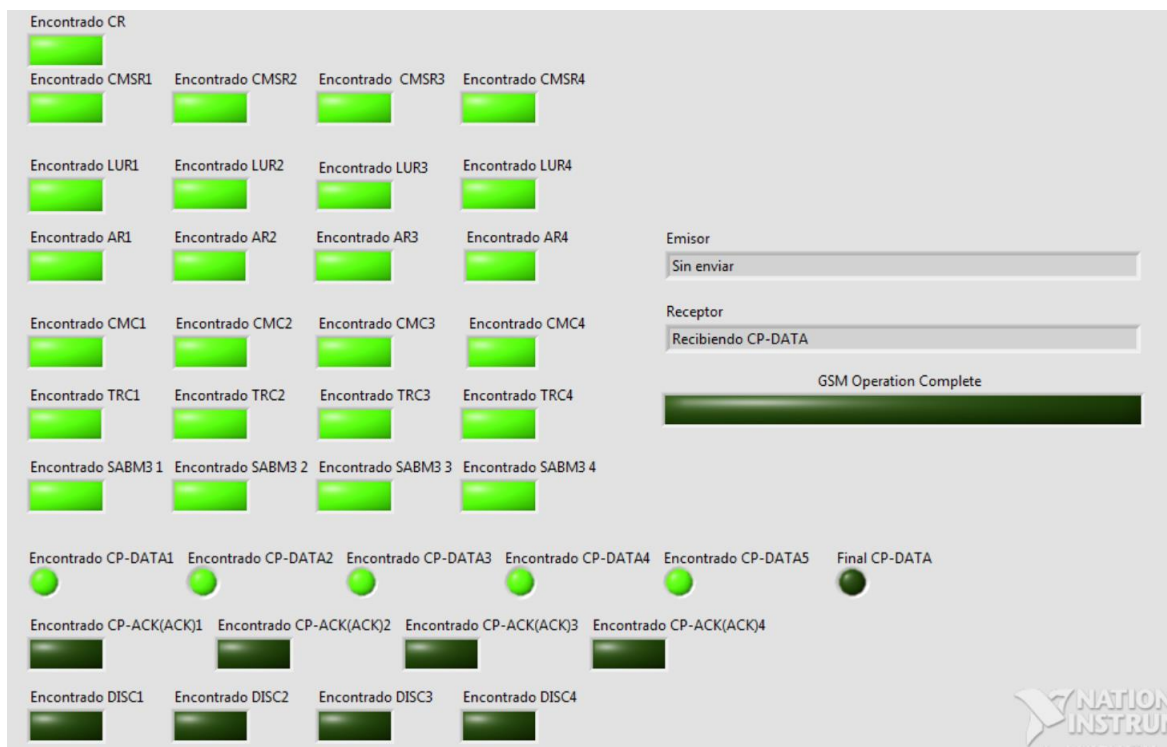


Figura 79: "BTS.vi" Recibido primer CP-DATA

Posteriormente, se muestra el estado del panel frontal una vez recibidos todos los mensajes con los canales del CP-DATA. El transmisor se encarga entonces de enviar el asentimiento a la MS.



Figura 80: "BTS.vi" Recibido CP-DATA final

La MS una vez realizados todos los procesos ya mencionados anteriormente, y habiendo transmitido ya el mensaje que contiene el SMS, recibe el asentimiento y se encuentra a la espera de los mensajes CP-DATA de la BS que contienen el asentimiento para las capas internas del servicio de mensajes cortos (SM-RL y SM-TL).



Figura 81: "MS.vi" Antes CP-DATA

En la siguiente figura se muestra el estado del panel frontal una vez recibidos los asentimientos. Como se puede ver, el indicador de la parte 5 del mensaje CP-DATA se encuentra apagado, esto indica que dicho mensaje sólo ocupaba un canal.

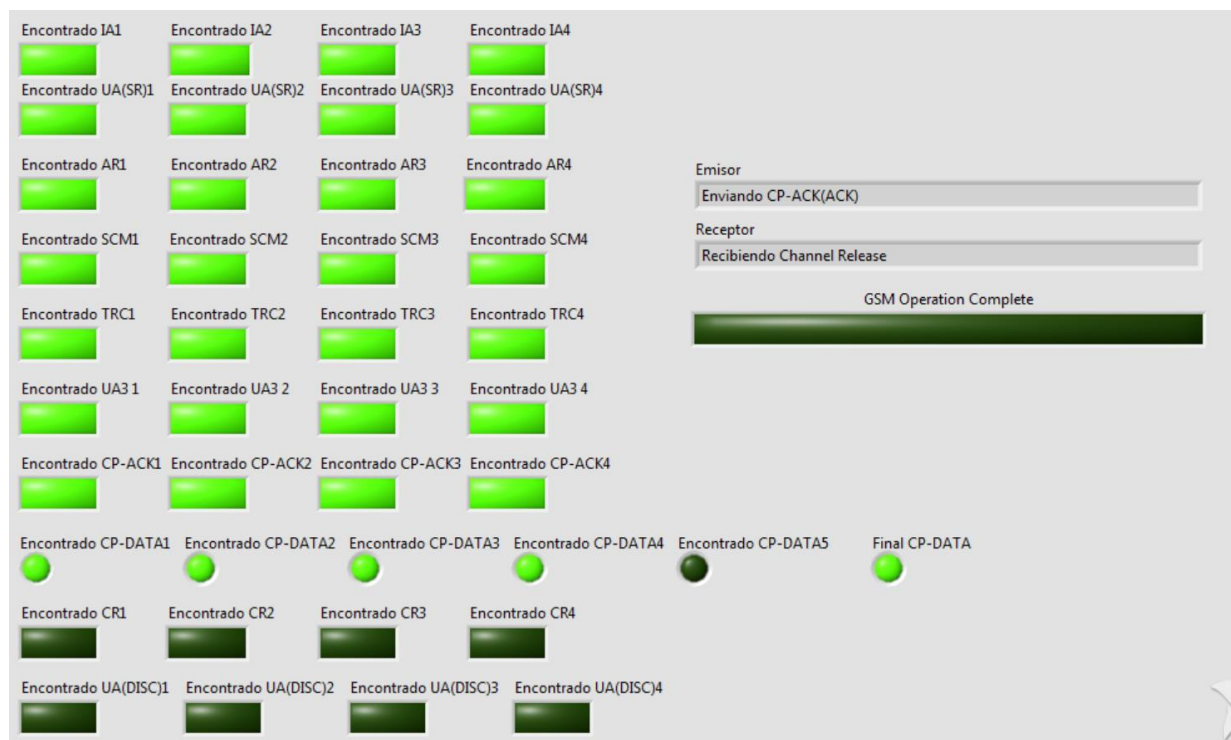


Figura 82: "MS.vi" Recibido CP-DATA

Por último se muestran las capturas de ambos bloques una vez terminados todos los procesos y después de la finalización de sus ejecuciones.

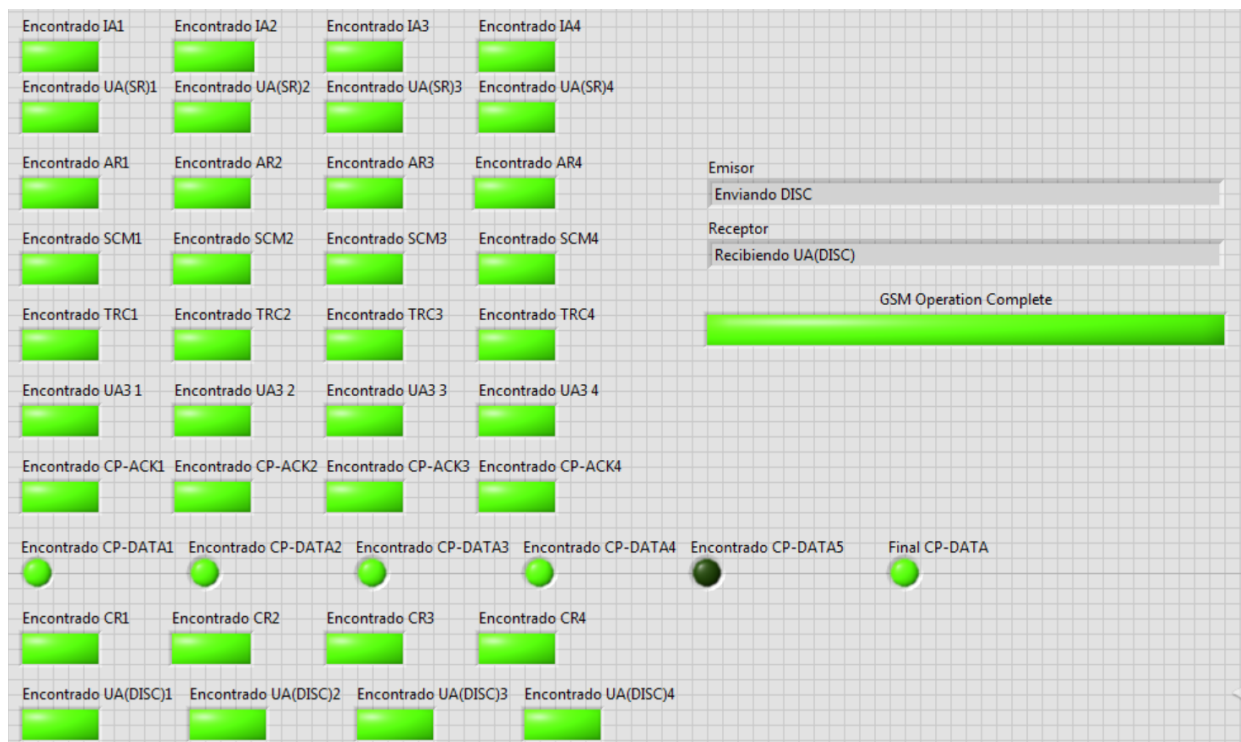


Figura 83: "MS.vi" Final

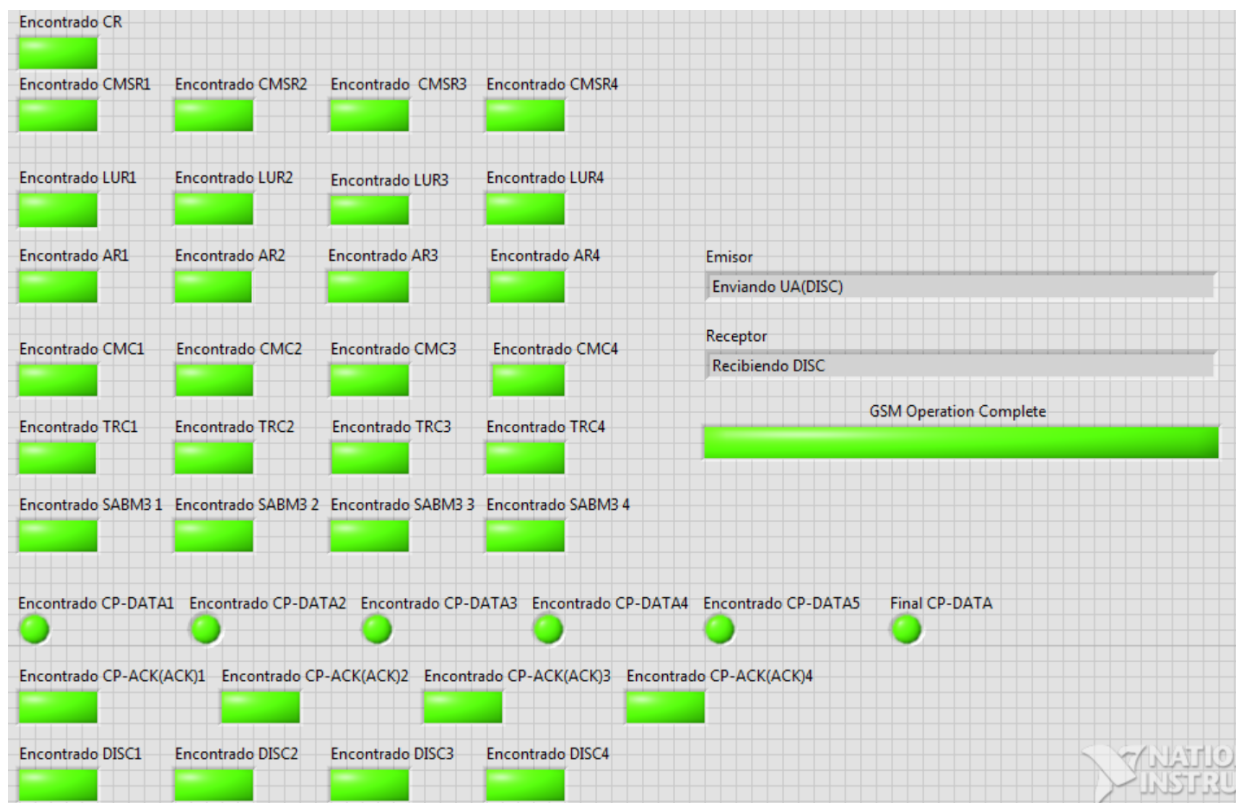


Figura 84: "BTS.vi" Final

Así pues, se demuestra que el software implementado cumple con los objetivos del proyecto y permite realizar el envío de un SMS del móvil a la estación base.

Para terminar con la fase de pruebas se ha comprobado que los mensajes enviados desde el bloque MS relativos a los canales CP-DATA (una vez codificados según el canal), coinciden con los mensajes que se muestran en los indicadores CP-DATA messages. Así mismo, se ha comprobado también que los mensajes contruidos siguen las descripciones proporcionadas en el estándar GSM.

8. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto era la implementación del envío de mensajes cortos de texto siguiendo el estándar GSM y usando para ello una plataforma SDR. Como se ha demostrado, este objetivo se cumple y además, permite visualizar el proceso desarrollado, por lo que es apto para la docencia, lo cual es la finalidad del proyecto.

También se ha demostrado que este software permite la integración de nuevas funcionalidades sin modificar gran parte del software ya implementado, ya que, como se ha explicado a lo largo del presente documento, el desarrollo se ha realizado usando bloques ya diseñados y se han integrado todos los procesos ya desarrollados, no sólo los relativos al servicio de SMS.

En el caso de este trabajo, se ha realizado usando sólo un ordenador para controlar ambos transceptores, pero el hecho de realizar los bloques que simulan la MS y la BS de forma totalmente independiente, permite la realización de simulaciones en escenarios más semejantes a la realidad, en los cuales, la estación base y la estación móvil se encuentren separadas y los transceptores correspondientes a cada uno de ellos se controlen por ordenadores diferentes.

Por otro lado, el entorno de programación usado, al usar un lenguaje de programación gráfico, facilita las modificaciones en el programa desarrollado. Esto ayuda a la inclusión de nuevos procesos y a la modificación de los existentes, posibilitando de forma sencilla por ejemplo, la modificación de los campos fijos de los mensajes.

En lo relativo al estándar GSM, como ya se comentó en los trabajos previos, hay algunos aspectos que no han sido implementados debido a su complejidad, por ejemplo la sincronización de los mensajes. Aun así, el programa permite simular el intercambio de mensajes de forma que cualquier persona pueda entender el proceso realizado.

El futuro de esta serie de TFGs es muy amplio por todo lo explicado anteriormente:

- Para completar el servicio de SMS se podría realizar un proyecto que permita la recepción de un SMS en otra estación móvil, que use el sistema desarrollado en este trabajo para realizar el envío.
- Otra extensión del servicio de SMS posible es la simulación de fallos en la transmisión y el desarrollo de los procesos de notificaciones y reenvío de mensajes asociados.
- Otra línea de trabajo futura supondría la modificación del software existente para que se asemeje más a la realidad del estándar GSM, realizando por ejemplo, la sincronización descrita en el mismo.
- Por último, sería posible y relativamente sencillo como se explicó previamente, implementar nuevas funcionalidades del estándar GSM que impliquen nuevos procesos y mensajes.

Siguiendo las líneas de trabajo futuras ya mencionadas, al final, se obtendría un sistema que simularía prácticamente por completo el estándar GSM, lo que facilitaría en gran medida la enseñanza relacionada con este tipo de red y, demostraría el gran potencial de las plataformas SDR.

9. CONCLUSIONS

The main goal of this project was to implement the short text messages deliver in GSM using a SDR platform. As it has been demonstrated, this aim is fulfilled and is possible to visualize the developed process, with which it's suitable for education.

Also it has been shown that this software allows new features integration without modifying great part of the software implemented. This is detailed along this document that explains that the program has been developed using already made blocks.

This project has been made using one PC to control both transceivers, but as the MS and BTS blocks are independent, this allows to perform more realistic simulations, in which the mobile station and the base station are separated and its transceivers are controlled by different PC's.

In addition, the programming environment used facilitates modifications in the developed software due to its graphical character. This helps to include new processes and to modify the existing ones, for example, to modify the existing fixed fields of the messages.

As regards GSM standard, there are some aspects that have not been implemented due to its complexity, for example, the messages synchronization. Even so, the program allows to simulate the messages exchange so any person could understand the process performed.

The future of this series of projects is very wide due to the reasons detailed before:

- To complete the SMS service, it might realize a project that allows receiving the SMS in another mobile station using the developed system in this project to make the sending of the messages.
- Another possible SMS extension is the error simulation in transmission or reception and the development of the notifications and reforwarding processes.
- Another future line of work would involve modifying the existing software to be more realistic, for example developing the real synchronization.
- Finally, it might be possible to implement new GSM features that implies new processes and messages.

Following the lines of work already mentioned, it would be obtained a system that simulates almost completely GSM standard. It would facilitate the education related with this type of network and it would demonstrate the great potential of the SDR platforms.

ANEXOS

A. SUMMARY

A.1. Introduction

The GSM technology uses different hardware devices to perform the features offered. With the appearance of SDR platforms it's possible to implement the functionalities performed by these hardware devices in software to be executed by a generic processor.

The main target of the project is to implement the Short Message Service (SMS) that is included in the GSM standard using the SDR technologies. The project aims to use transceivers to simulate the message exchange process realized to send a text message from the mobile station to the base station.

As a secondary objective, this implemented process will merge into the existing GSM processes implemented in previous projects like the Fernando Rabadán project that implements the "Location Update" process [1].

The project also aims to show this process so that it could be used in education to show the GSM functionalities in a hands-on way.

A.2. Project Analysis

Since the appearance of the mobile communications its use has been growing up to coming to the current situation in which there are so many mobile subscriptions as inhabitants in the world. Due to this, a great advance has taken place in the field of mobile communications.

One of this advances is the SDR technology that allows to implement a lot of hardware devices functionalities in software.

This project will use the SDR platform LabVIEW with the NI-USRP 2920 transceivers, but there are other SDR platforms that might have been used like GNURadio, SoapySDR, Photos SDR or SDR-Radio.com.

As regards SMS simulation existing solutions there are tools like GL's MAPS that allows to simulate the GSM message exchange process. Furthermore, there are tools that allows to visualize the SMS messages like "Javascript PDU Converter" [9], "Online SMS PDU Decoder" [10] y "SMSPDU" [11].

On one hand, the legal frame that concerns the project includes only the Copyright of the project. On the other hand, the project is involved in the technical frame that includes rules described in the "Código de las Telecomunicaciones" [13] like restrictions with regard to radioelectric emissions.

In relation to the economic environment, this project is affected mainly by the decrease in education investment.

Finally, taken into account the material costs and the human resources, the budget of the project is 25293€, and the duration of the same one has been 170 days.

A.3. GSM

GSM standard started being developed in 1982. His specifications were finished at the beginning of the 90s.

The GSM network architecture is composed by three main subsystems: Mobile Station (MS), Base Station Subsystem (BSS) and Network Subsystem (NSS).

Services offered by GSM are divided in two categories: basic services like Digital Telephony, Short Message Service or Emergency Call, and, supplementary services like Call Forwarding and Tariffication.

In this project the main aspect of GSM stadard is the GSM radio interface, which will be simulated using LabVIEW and the transceivers NI-USRP. This interface is composed by three main layers.

First layer is “Physical Layer”, which one performs tasks like modulation, burst construction, multiplexing, synchronization and codification.

The modulation used in GSM is GMSK, which is a modification of the traditional MSK modulation.

There are some types of burst depending on his use: Normal Burst for standard communications, Frequency Burst for frequency synchronization, Synchronization Burst for time synchronization, Dummy Burst for keeping the channels busy, and, Access Burst to Access the network.

The multiplexing is made by using FDMA (Frequency Division Multiplexing Access) and TDMA (Time Division Multiplexing Access) methods. The carriers are separated in frequency (FDMA) and each carrier is shared in time by some users (TDMA). The TDMA frame is composed by 8 time intervals called timeslots. Each timeslot is a physical cannel. The data are transmitted in each timeslot with a burst.

Also, the frames are grouped in the following way: the frames are grouped in multiframes, these multiframes are grouped in superframes and, the superframes, are grouped in hyperframes.

The codification made provides Forward Error Correction (FEC) introducing redundancy with an Error Correction Code (ECC).

Each information type transmitted by a phisycal channel represents a logical channel. There are two main types of logical channels: Traffic Channels for transmitting voice and data, and, Signalling Channels like Standalone Dedicated Control Channel or Random Access Channel, which are used for transmitting messages related to signalling and control.

Second layer is “Data Link Layer” which implements the previous processes made to use the GSM services. In this project this layer will be used to notify the BS that the MS is going to use the SMS service.

Third layer is “Network Layer” that performs the managing and the signalling of the used services.

Finally, in GSM the security is implemented using subscriber secret numbers included in his Subscriber Identity Module (SIM) and random numbers provided by the network. The algorithms used to cipher the communications are A3, A5, and A8.

A.4. Resources used

In this project were used the following resources: a MacBook Pro laptop for using the programming software, LabVIEW to implement the software that interacts with the transceivers, and, two transceivers NI USRP 2920 to perform the transmission and the reception of the data.

A.5. Software development

The first step of the design of the software was to study the GSM documentation. After this studying, we obtained the exchange messages diagram.

For each message involved in the exchange messages process was used the following procedure:

1. User data obtaining.
2. Obtained data codification.
3. Message construction.
4. Channel codification of each message.
5. Frame division of the message.
6. Introduction of each division in the corresponding burst.
7. Burst modulation.
8. Introduction of each modulated burst in slots. After it, 8 slots are grouped in one frame.
9. Frame delivering using USRP.
10. Frame receiving using USRP.
11. Search of the bursts inside the reception buffer.
12. Bursts bits deleting.
13. Obtained bits are joined to form the codificated message.
14. Channel decodification of the message.

To perform the construction of the message related to the SMS service was followed the layer structure described in GSM 04.11 Point-to-Point (PP) Short Message Service (SMS). Support on Mobile Radio Interface [34].

Each layer described is a functional block of the software. In the Base Station block was included the Service Centre to process and to response MS messages.

The functional block “DLL.vi” performs the creation of the messages related to the Data Link Layer. This messages are SABM (CM-Serv-Req), SABM (SAPI=3), DISC (SAPI=0), UA (CM-Serv-Req), UA (SAPI=3) and UA (DISC). There are two blocks called “DLL.vi”, one for the Base Station and other for the Mobile Station.

The block “MM-Sublayer.vi” performs the creation of the message related to Mobility Management Sublayer. This message CM-Serv-Req. It is made for the MS.

“SM-AL.vi” functional block obtains the user data. It is made for the MS.

The functional block “SM-TL.vi” performs the creation of the messages related to the Short Message Transfer Layer. This messages are SMS-SUBMIT and SMS-SUBMIT-REPORT. There are two blocks called “SM-TL.vi”, one for the BS and other for the MS.

“SM-RL.vi” block performs the creation of the messages related to the Short Message Relay Layer. This messages are RP-DATA and RP-ACK. There are two blocks called “SM-RL.vi”, one for the Base Station and other for the Mobile Station.

Finally, last layer of the SMS layer structure is Connection Management Sublayer, which is implemented by “CM-Sublayer.vi” blocks. The messages created by this functional block are CP-DATA and CP-ACK. There are two blocks called “CM-Sublayer.vi”, one for the BS and other for the MS.

The construction of the messages is grouped in one functional block called “Seleccionar Mensaje.vi”. Introducing the name of the message this blocks calls another blocks to construct the selected message.

Furthermore, there are some blocks that performs the other tasks made for each message.

For channel codification exists the block “SDCCH.vi”.

After, this cannel message is divided and each division is introduced in one burst. The block that performs the bursts construction is “Bursts.vi”.

The bursts modulation is made by “Modulador.vi”.

This two previous mentioned blocks are called from the block “CreateSlots.vi” that obtains a bit sequence that composes one slot.

Joining the slots to create the frame is made in the functional block called “Slots.vi”.

To perform the transmission of the frames, first, it’s neccesary to introduce the frames inside one waveform. This task is made by two blocks: “Elegir mensaje modulado.vi”, and “GetWaveforms.vi” for CP-DATA messages. The main reason because the same task is made by two diferent blocks is that CP-DATA messages are transmitted using more tan one channel.

The second step to transmit is passing the waveform to the transceiver. This task is made in the main blocks of the software, “MS.vi” and “BTS.vi”.

The reception of the data was implemented in the mentioned main blocks of the software.

After the reception, the data are spent to “Receptor Patron.vi” that performs the demodulation.

Finally, the functional block “Decodificador SDCCH.VI” performs the channel decodification to obtain the transmitted mesage.

The process described before have been integrated in the two main blocks of the software “BTS.vi” and “MS.vi” that allows to the user managing and visualizing the process.

A.6. Final tests

The tests have been performed in the UC3M laboratories. The final system to make the tests is the following:



Figura 85: Final System

Using the front panel of the main blocks of the program, the functionality of the software have been verified, and after this, it's possible to say that the system fulfills the established aims.

A.7. Conclusions

As it has been demonstrated in the testing phase of the project, the goals have been reached. The software implemented performs the exchange process made during the transmission of a SMS and allows to the user to visualize it.

Also, the SMS message process have been integrated into the previous projects, so the software performs all the previous and later tasks.

The software allows to make tests in different scenarios like a scenary where the base station and the mobile station are separated and controlled by different PCs.

The environment program used allows to perform modifications in an easy way.

Regarding the GSM standard, some aspects of it have not been implemented due to its complexity.

This series of project in the future could obtain a software that simulates almost completely GSM standard without using a lot of hardware devices.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Rabadán, «Implementación del procedimiento "Location Update" de GSM en plataforma Software Defined Radio,» Leganés, 2015.
- [2] ITU, «Estadísticas e Indicadores,» [En línea]. Available: <http://www.itu.int/pub/D-IND/es>. [Último acceso: 5 Agosto 2016].
- [3] PRB, «DataFinder PRB's Hub for U.S. and International Data,» [En línea]. Available: <http://www.prb.org/DataFinder.aspx>. [Último acceso: 5 Agosto 2016].
- [4] G. R. Foundation, «GNURadio, The free & open software radio ecosystem,» [En línea]. Available: <http://gnuradio.org/>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [5] Photos, «Welcome to the SoapySDR project,» [En línea]. Available: <https://github.com/pothosware/SoapySDR/wiki>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [6] Pothosware, «Pothos SDR toolkit,» [En línea]. Available: <https://github.com/pothosware/pothos-sdr/wiki>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [7] SDR-Radio.com, «SDR-Radio.com,» [En línea]. Available: <http://sdr-radio.com/>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [8] G. C. Inc., «Message Automation & Protocol Simulation (MAPS™),» [En línea]. Available: <http://www.gl.com/signaling-and-traffic-simulator.html>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [9] S.-P. Ekkebus, «JavaScript PDU Converter,» [En línea]. Available: <http://rednaxela.net/pdu.php>. [Último acceso: 8 Agosto 2016].
- [10] Diafaan, «Online SMS PDU Decoder,» [En línea]. Available: <https://www.diafaan.com/sms-tutorials/gsm-modem-tutorial/online-sms-pdu-decoder/>. [Último acceso: 8 Agosto 2016].
- [11] J. bvba, «SMSPDU,» [En línea]. Available: <http://www.smspdu.com/>. [Último acceso: 8 Agosto 2016].
- [12] International Journal of Engineering Trends and Technology, «Design & Simulation of GSM FH Transmitter,» [En línea]. Available: <http://www.ijettjournal.org/2015/volume-30/number-8/IJETT-V30P272.pdf>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [13] BOE, «Código de las Telecomunicaciones,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/legislacion/codigos/abrir_pdf.php?fich=110_Codigo_de_las_Telecomunicacion.es.pdf. [Último acceso: 9 Agosto 2016].

- [14] BOE, «Real Decreto 1066/2001,» 2001 Septiembre 29. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2001/09/29/pdfs/A36217-36227.pdf>. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [15] CCOO, «Crisis económica y financiación educativa: evolución de la inversión (2009-2013),» 22 Junio 2016. [En línea]. Available: http://www.fe.ccoo.es/comunes/recursos/25/2253679-Resumen_ejecutivo.pdf. [Último acceso: 9 Agosto 2016].
- [16] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Tema 4 - Redes de comunicaciones móviles terrestres, Leganés, 2015.
- [17] Tutorialspoint, «GSM - The Base Station Subsystem(BSS),» [En línea]. Available: http://www.tutorialspoint.com/gsm/gsm_base_station_subsystem.htm. [Último acceso: 11 Agosto 2016].
- [18] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Modulation,» 2002. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300900_300999/300959/08.01.02_60/en_300959v080102p.pdf. [Último acceso: 12 Agosto 2016].
- [19] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio Transmission and Reception,» 2005. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100910/08.20.00_60/ts_100910v082000p.pdf. [Último acceso: 12 Agosto 2016].
- [20] Wikipedia, «Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_desplazamiento_m%C3%ADnimo_gaussiano. [Último acceso: 12 Agosto 2016].
- [21] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Tema 3 - GSM (parte 2) - Interfaz, Leganés, 2015.
- [22] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiplexing and multiple access on the radio path,» Mayo 1996. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0502/05.00.00_60/gsmmts_0502v050000p.pdf. [Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [23] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Channel Coding,» Mayo 1996. [En línea]. Available: http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0503/05.02.00_60/gsmmts_0503v050200p.pdf. [Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [24] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile Station - Base Station System (MS - BSS) interface; Channel structures and access capabilities,» Abril 1997. [En línea]. Available:

- http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/04/0403/05.01.00_60/gsmmts_0403v050100p.pdf. [Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [25] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Data Link (DL) Layer General Aspects,» 2005. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100937/08.00.02_60/ts_100937v080002p.pdf.
[Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [26] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile Station - Base Stations System (MS - BSS) Interface Data Link (DL) Layer Specification,» 2001. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100938/08.04.00_60/ts_100938v080400p.pdf.
[Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [27] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface signalling layer 3; General aspects,» Marzo 1996. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/04/0407/05.01.00_60/gsmmts_0407v050100p.pdf. [Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [28] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface layer 3 specification,» 2002. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100940/07.17.00_60/ts_100940v071700p.pdf.
[Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [29] ValorTop, «Apple MacBook Pro Retina 13",» [En línea]. Available:
<http://www.valortop.com/macbook-pro-retina-13#>. [Último acceso: 17 Agosto 2016].
- [30] N. Instruments, «Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW,» [En línea]. Available:
<http://www.ni.com/labview/esa/>. [Último acceso: 17 Agosto 2016].
- [31] N. Instruments, «USRP-2920,» [En línea]. Available:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212995>. [Último acceso: 17 Agosto 2016].
- [32] N. Instruments, «GETTING STARTED GUIDE, NI USRP-2920/2921/2922,» [En línea]. Available:
<http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>. [Último acceso: 17 Agosto 2016].
- [33] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Alphabets and language-specific information,» 2007. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100900/07.02.00_60/ts_100900v070200p.pdf.
[Último acceso: 18 Agosto 2016].
- [34] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Technical realization of the Short Message Service (SMS) Point-to-Point (PP),» 2001. [En línea]. Available:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100901/07.05.00_60/ts_100901v070500p.pdf.
[Último acceso: 18 Agosto 2016].

- [35] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Layer 1; General requirements,» 1999. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100936/07.00.00_60/ts_100936v070000p.pdf.
[Último acceso: 18 Agosto 2016].
- [36] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Point-to-Point (PP) Short Message Service (SMS) Support on Mobile Radio Interface,» 2000. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100900_100999/100942/07.01.00_60/ts_100942v070100p.pdf.
[Último acceso: 18 Agosto 2016].
- [37] ETSI, «Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface layer 3 Supplementary services specification Formats and coding,» Agosto 1996. [En línea]. Available:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/04/0480/05.00.00_60/gsmmts_0480v050000p.pdf. [Último acceso: 18 Agosto 2016].